

Е. И. Мижутина^{1✉}

Новый дескриптор для защиты авторских прав на цифровые карты на основе методов кластеризации

¹Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
г. Ярославль, Российская Федерация
e-mail: eseniamizhutina@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается проблема защиты авторских прав на цифровые карты. Традиционные методы цифровых водяных знаков вносят искажения в координаты объектов. В данной работе предложен метод нулевого водяного знака, основанного на кластеризации точек объектов. Алгоритм включает разбиение карты на ячейки, итеративное расширение кластеров, вычисление центроида и формирование дескриптора в виде упорядоченной последовательности нормированных координат центроидов. Эксперименты проведены на картах масштабов 1:200000, 1:500000 и 1:1000000. Оценена устойчивость к атакам удаления объектов (сокращение точек на 25-50 %), добавления объектов (25-50 %) и уникальность дескриптора. Результаты показали, что дескриптор обладает высокой различимостью и устойчивостью.

Ключевые слова: нулевой водяной знак, цифровая карта, кластерный анализ, защита авторских прав

E. I. Mizhutina^{1✉}

A new descriptor for protecting copyright on digital maps based on clustering methods

¹Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russian Federation
e-mail: eseniamizhutina@yandex.ru

Abstract. The paper addresses the problem of protecting copyrights for digital maps. Traditional digital watermarking methods introduce distortions in the coordinates of objects. In this work, a zero watermarking method based on clustering of object vertices is proposed. The algorithm includes dividing the map into cells, iterative cluster expansion, centroid calculation, and forming a descriptor in the form of an ordered sequence of normalized centroid coordinates. Experiments were conducted on maps at scales of 1:200,000, 1:500,000 and 1:1,000,000. The resistance to object removal attacks (reducing vertices by 25–50%), object addition attacks (25–50%), and the uniqueness of the descriptor were evaluated. The results showed that the descriptor has high distinctiveness and robustness.

Keywords: zero watermark, digital map, cluster analysis, copyright protection

Введение

Цифровые карты являются дорогостоящим ресурсом. Их создание требует большого труда геодезистов, картографов и ГИС-специалистов. При этом векторные данные подвержены копированию, модификации, вследствие этого распространяются без разрешения правообладателя. Таким образом, проблема защиты пространственных данных является актуальной [1].

Методы защиты цифровых карт активно развиваются в рамках цифрового водяного знака (ЦВЗ) [2, 3]. Под ЦВЗ понимают сформированную последовательность битов, позволяющая подтвердить авторские права. Алгоритм вносит искажения в координаты объектов, не влияющие на восприятие карты [4, 5]. При извлечении водяного знака алгоритм, зная параметры внедрения, выделяет последовательность из координат и сравнивает с эталонной, подтверждая авторство. Однако, некоторые методы внедрения уязвимы к геометрическим атакам, что усложняет процесс извлечения водяного знака.

В качестве альтернативы выступает технология нулевого водяного знака [6-8]. В отличие от классического подхода, нулевой водяной знак не вносит изменения в координаты. Вместо этого формируется дескриптор, который вычисляется на основе некоторых характеристик цифровых карт [9-11]. Дескриптор хранится в реестре, где указано авторство. При возникновении спора о правах, основываясь на характеристиках проверяемой карты вычисляется дескриптор. Его совпадение с зарегистрированным подтверждает авторство. Нулевой водяной знак сохраняет исходный вид карты и обеспечивает доказуемость авторских прав.

Целью настоящей работы является продолжение разработки и усовершенствование авторского метода защиты векторных карт на основе кластерного анализа [12], в котором дескриптор будет устойчив к атакам удаления/добавления объектов, обеспечивать высокую различимость разных карт. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. модифицировать алгоритм формирования дескриптора на основе кластеризации;
2. реализовать процедуры генерации, извлечения и верификации дескриптора;
3. экспериментально оценить уникальность и устойчивость метода к основным видам атак.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов цифрового нулевого водяного знака. Практическая значимость состоит в создании алгоритма, пригодного для интеграции с ГИС-платформами.

Методы и материалы

Пространственные данные представляют собой информацию о географических объектах, выраженную с помощью точек, линий (ломаных) и полигонов (замкнутых ломаных). В геоинформационных системах (ГИС) они представлены в виде координат, которые позволяют определить местоположение объектов на поверхности Земли. Такое представление позволяет эффективно описывать пространственные объекты, их форму, расположение и отношение друг к другу [13].

Разработанный метод относится к классу нулевых водяных знаков, он не вносит изменений в координаты исходной карты. Защита авторских прав обеспечивается за счет генерации дескриптора на основе кластерного анализа. Процесс включает два этапа: формирование дескриптора, верификация – из проверяемой карты повторно вычисляется дескриптор и сравнивается с оригинальным.

Алгоритм основывается на кластеризации точек объектов цифровой карты. Основные этапы метода:

1. Все объекты карты проецируются на один слой и переводятся в точечный вид. Затем на карту набрасывается сетка с размером ячейки 1 см в масштабе карты (рис. 1), что позволяет ускорить процесс кластеризации. Для поиска соседних точек достаточно анализировать не все точки карты, а только точки из соседних ячеек.

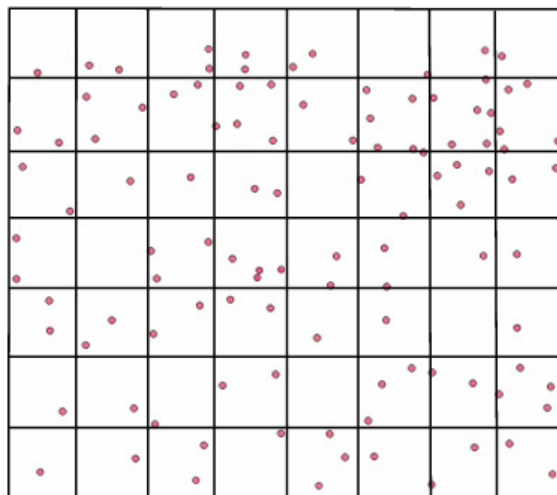


Рис. 1. Карта, покрытая сеткой

2. Подсчитывается количество точек в каждой ячейке. Формируется набор ячеек, в которых точек на 20 % больше, чем среднее количество точек в ячейке. Ячейки сортируются по мощности (по убыванию числа содержащихся в них точек). Каждая ячейка из сформированного набора содержит потенциальный центр кластера (рис. 2).

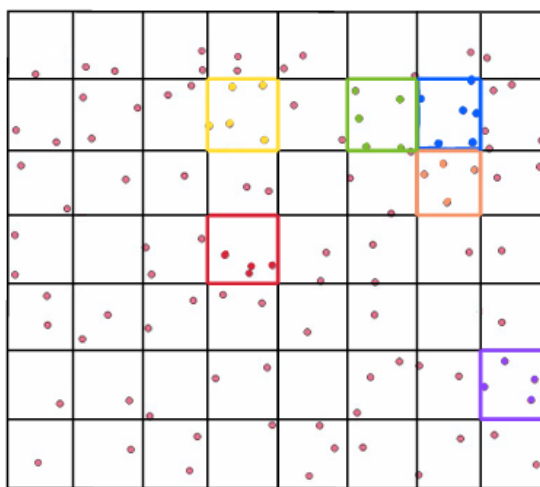


Рис. 2. Ячейки, содержащие потенциальные центры кластеров

3. Алгоритм последовательно обрабатывает каждую ячейку из сформированного набора. Точки крупных ячеек становятся ядром кластеров. На первой итерации в кластер включаются точки из соседних ячеек на расстоянии 1 (восемь непосредственно примыкающих ячеек). При этом, точки, уже отнесенные к ранее сформированным кластерам, не включаются (рис. 3 а)). На шаге i к кластеру присоединяются координаты из ячейки на расстоянии i от исходной. Процесс повторяется, пока на очередном шаге не будет добавлено ни одной новой точки. Это условие остановки делает алгоритм адаптивным к локальной плотности ячеек. Важной особенностью является синхронизация расширения кластеров: сначала выполняется шаг 1 для всех кластеров, затем шаг 2 и так далее. Такой подход предотвращает преждевременное расширение одного кластера и обеспечивает более равномерное распределение (рис. 3б)).

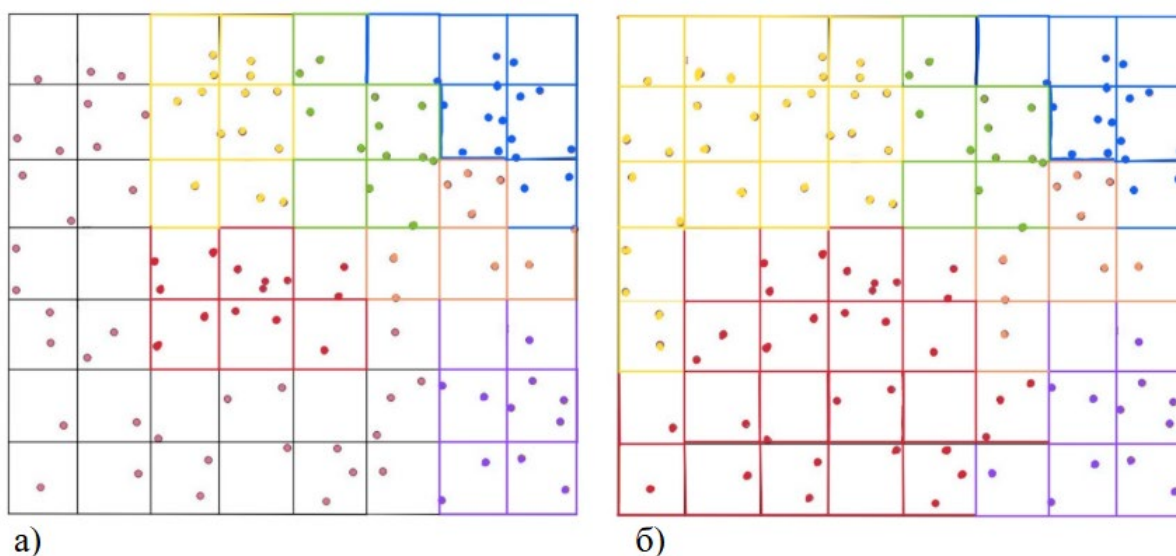


Рис. 3. а) Шаг 1 алгоритма кластеризации, б) шаг 3 алгоритма кластеризации

4. Для каждого кластера определяется его центроид. Центроидом кластера считается точка, имеющая минимальную сумму евклидовых расстояний до остальных точек этого же кластера. Такой выбор устойчив к выбросам и лучше отражает центр скопления точек.

Дескриптором является последовательность координат центроидов кластеров относительно сетки.

Для верификации авторства проверяемой карты ее дескриптор сравнивается с эталонным дескриптором. Используется метод попарного сравнения. Перебираются все возможные варианты сдвига между любыми двумя точками из разных наборов. Для каждого сдвига проверяется, сколько точек из первого набора после переноса совпадают с точками второго. Результатом является максимальный процент совпадения.

Тестирование проводилось на картах масштабов 1:200000, 1:500000, 1:1000000. Для проверки устойчивости и уникальности разработанного дескриптора проводились следующие эксперименты:

- устойчивость к атаке удаления объектов – атака моделирует процесс картографической генерализации, при котором удаляются точки, вносящие наименьший вклад в форму объекта. Для сравниваемой карты применялся алгоритм Дугласа-Пейкера [14]. Сокращение точек проводилось на 25 %, 33 % и 50 %;
- устойчивость к атаке добавления объектов – к исходной карте добавлялись слои, увеличивающие общее количество точек на 25 %, 33 % и 50 %;
- уникальность дескрипторов – сравнивались дескрипторы карт разных местностей одного масштаба, а также карты одной местности разных масштабов.

Результаты

В табл. 1 приведены значения процента соответствия дескриптора после применения алгоритма Дугласа-Пейкера с сокращением количества точек на 25 %, 33 % и 50 % для карт масштабов 1:200000, 1:500000 и 1:1000000.

Таблица 1. Устойчивость дескриптора к атаке удаления объектов

Сокращение точек, %	Процент соответствия, %
25	83-94
33	84-88
50	66-85

С увеличением степени упрощения процент соответствия ожидаемо снижается. При сокращении точек на 50 % соответствие варьируется от 66 % до 85 % в зависимости от структуры карты, что свидетельствует об удовлетворительной устойчивости дескриптора к генерализации.

В табл. 2 представлены результаты устойчивости дескриптора к добавлению посторонних картографических слоев, увеличивающих общее количество точек на 25 %, 33 % и 50 %.

Таблица 2. Устойчивость дескриптора к атаке добавления объектов

Добавление точек, %	Процент соответствия, %
25	90-94
33	82-86
50	80-84

Добавление посторонних объектов оказывает незначительное влияние на дескриптор. Даже при увеличении количества точек на 50 % соответствие сохраняется на уровне не ниже 80 %. Это объясняется тем, что кластеры, сформированные исходной картой, сохраняют наибольшую мощность и остаются в начале упорядоченного списка дескриптора.

В табл. 3 приведены результаты сравнения дескрипторов карт разных местностей одинакового масштаба.

Таблица 3. Сравнение дескрипторов карт разных местностей

Масштаб карты	Процент соответствия, %
1:200000	26-40
1:500000	20-44
1:1000000	26-28

Полученные значения находятся в диапазоне от 20 % до 44 %, что значительно ниже типичных значений при сравнении идентичных карт (80 %-94 %).

В табл. 4 представлены результаты сравнения карт одной местности, выполненных в разных масштабах (1:200000, 1:500000, 1:1000000).

Таблица 4. Сравнение дескрипторов карт одной местности разных масштабов

Сравниваемые масштабы карт	Процент соответствия, %
1:200000 к 1:500000	26-29
1:200000 к 1:1000000	27-30
1:500000 к 1:1000000	28-32

При сравнении карт одной местности разных масштабов процент соответствия находится в диапазоне 26 %-32 %, что сопоставимо со значениями для разных карт (табл. 3). Это означает, что разработанный метод распознает карты одной территории, но разной детализации, как различные.

Заключение

В ходе выполнения данной работы был разработан и экспериментально исследован новый метод формирования нулевого водяного знака для защиты авторских прав на цифровые векторные карты, основанный на итеративной пространственной кластеризации точек.

Разработанный метод продемонстрировал высокую устойчивость к атаке добавления посторонних объектов, устойчивость к упрощению является удовлетворительной. Снижение устойчивости при больших упрощениях объясняется тем, что значительное прореживание точек изменяет плотностную структуру кластеров.

Дескриптор обладает высокой различимостью: при сравнении карт разных местностей процент соответствия составляет 20 %-44 %, что значительно ниже порога подтверждения авторства (который для идентичных карт составляет 80 %-94 %). Это гарантирует низкую вероятность ложного подтверждения авторства. Разработанный метод не эффективен для задачи сопоставления карт различного масштаба.

Перспективными направлениям являются: разработка модификации метода, исследование устойчивости к другим видам атак.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Emerson Xavier, Francisco Ariza-Lopez, Manuel Urena-Camara. A Survey of Measures and Methods for Matching Geospatial Vector Datasets. – 2006. – DOI: 10.1145/2963147.
2. Peng Y., Lan H., Yue M. et al. Multipurpose watermarking for vector map protection and authentication // *Multimed Tools Appl.* – 2018. – Vol. 77. – P. 7239–7259.
3. Abubahia A., Cocea M. Advancements in GIS map copyright protection schemes — a critical review // *Multimedia Tools and Applications.* – 2017. – Vol. 76, No. 10. – P. 12205–12231.
4. Выборнова Ю. Д., Сергеев В. В. Метод защиты векторных карт с использованием изображения ЦВЗ как вторичного контейнера // *Компьютерная оптика.* – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 474–483.
5. Zhang L., Yan H., Zhu R., Du P. Combinational spatial and frequency domains watermarking for 2D vector maps // *Multimedia Tools and Applications.* – 2020. – Vol. 79. – P. 31375–31387.
6. Xi X. et al. Dual Zero-Watermarking Scheme for Two-Dimensional Vector Map Based on Delaunay Triangle Mesh and Singular Value Decomposition // *Appl. Sci.* – 2019. – Vol. 9, No. 4. – P. 642.
7. Du J., Yi W., Xu X., Zhang J. Vertex attack resistant zero-watermarking for vector maps based on geometric feature mining using Delaunay triangulation network // *Earth Science Informatics.* – 2025. – Vol. 18, No. 3. – DOI: 10.1007/s12145-025-01806-z.
8. Wang X., Huang D., Zhang Z. A Robust Zero-Watermarking Algorithm for Vector Digital Maps Based on Statistical Characteristics // *Journal of Software.* – 2012. – Vol. 7, No. 10. – P. 2349–2356. – DOI: 10.4304/jsw.7.10.2349-2356.
9. Якимова О. П., Горшков В. Г. Новый дескриптор на основе частотного анализа для защиты векторных карт // *Материалы 34-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению GRAPHICON 2024.* – Омск: Омский государственный технический университет, 2024. – С. 708–714. – DOI: 10.25206/978-5-8149-3873-2-2024-708-714.
10. Wang S., Zhang L., Zhang Q. A zero-watermarking algorithm for vector geographic data based on feature invariants // *Earth Sci. Inform.* – 2023. – Vol. 16. – P. 1073–1089.
11. Zhou Q., Yang C., Wang Y. Zero Watermarking Algorithm for Vector Geographic Data Based on the Number of Neighboring Features // *Symmetry.* – 2021. – Vol. 13, No. 2. – P. 208.
12. Мижутина Е. И. Нулевой водяной знак для защиты пространственных данных на основе кластерного анализа // *Путь в науку. Математика: тезисы докладов конференции / под ред. И. С. Кашенко, Д. А. Куликова.* – Ярославль: Канцлер, 2025. – С. 88–90. – ISBN 978-5-908075-43-5.
13. Tang Z., Zhang Y., Huang J., He H., Ding Y. A Novel Infringement Detection Method for GIS Vector Data // *ISPRS International Journal of Geo-Information.* – 2020. – Vol. 9, No. 1. – P. 12. – DOI: 10.3390/ijgi9010012.
14. Douglas D. H., Peucker T. K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature // *The Canadian Cartographer.* – 1973. – Vol. 10, No. 2. – P. 112–122. – DOI: 10.3138/FM57-6770-U75U-7727.

© Е. И. Мижутина, 2026