

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ершов Андрей Александрович —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru
Развозов Сергей Юрьевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_mus@gumrf.ru
Петухов Павел Игоревич — аспирант.
Научный руководитель:
Ершов Андрей Александрович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
sevarus89@gmail.com, kaf_mus@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ershov Andrey Alexandrovich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru
Razvozov Sergey Jrevich
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
razvozov.su@mail.ru
Petuhov Pavel Igorevich — postgraduate.
Supervisor:
Ershov Andrey Alexandrovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sevarus89@gmail.com, kaf_mus@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 30 августа 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-29-38
УДК 519. 22:004.67

**Д. А. Акмайкин,
С. Ф. Ключева,
П. А. Салюк**

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРАФА МАРШРУТА СУДНА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

В современной теории графов для исследователей актуален класс задач, связанных с формированием графа, построением его вершин и ребер на основе заданных условий и большого числа исходных данных. Такие задачи относят к классу нереализуемых задач. Методы искусственного интеллекта, кластерного анализа, применение эвристических и эволюционных алгоритмов совместно с новыми компьютерными технологиями позволяют решать подобные задачи наиболее эффективным образом. Задача формирования графа маршрута движения судна относится к классу таких задач. Эвристика заключается в возможности применения результатов кластеризации исходной цифровой базы данных как основы для формирования вершин и ребер графа. Данная задача является предметом рассмотрения статьи. В статье используется цифровая база района плавания, которая включает отметки глубин, высот и мелей. Метод кластеризации осуществляется на базе метрики, учитывающей расстояние между точками на карте и разность глубин. Приведены численные значения параметров кластеризации и числовые значения расчета критерия качества кластеризации для различных значений коэффициентов метрики. Разработан, реализован программно и подробно описан алгоритм кластеризации. Приведены результаты программного моделирования алгоритма на участке, характеризующимся извилистой береговой чертой, наличием мысов, мелей, бухт и заливов, а также распределением островов в районе построения маршрута. На основе кластеризации выполнено формирование графа путей движения судна. Приведен алгоритм построения вершин и ребер графа. Программная модель позволяет визуализировать исходную цифровую базу данных и полученные результаты. В заключение указаны основные необходимые направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова: кластеризация, метрика, качество кластеризации, путь судна, электронная навигационная карта.

Введение

Задачи на графах реализуют большой круг прикладных проблем во многих областях науки и техники. Среди задач, основанных на современной теории графов, актуален для исследования класс задач, связанных с формированием исходного графа, его вершин и ребер на основе некото-

рых начальных условий и данных. Особую сложность представляют задачи построения графа для больших объемов исходных данных порядка миллиона точек. Как известно, такие задачи относятся к классу нереализуемых задач. Необходимы новые методы и алгоритмы, позволяющие строить граф наиболее эффективными способами. Примером такой задачи является проблема программного формирования графа маршрута движения судна для заданной акватории океана. Ограничения, связанные с вычислительными ресурсами компьютера, не позволяют найти решение методом полного перебора всех возможных вариантов для исходных баз данных, содержащих миллионы точек. Поэтому для таких задач необходимы другие методы, позволяющие оперировать группами точек и областей, схожих по некоторым наиболее важным факторам. Основой таких решений является кластерный анализ и применение эвристических алгоритмов.

Применение кластерного анализа в автоматизированных навигационно-информационных системах позволит выполнять анализ района плавания и формировать маршрут движения судна в автоматическом режиме для заданного района с учетом ошибок и неточностей оцифровки навигационных карт, а также погрешностей моделирования электронных карт [1], [2].

В общем виде алгоритм и примеры программной кластеризации для простых областей моря приведены в работах [3], [4]. В данных работах описаны результаты реализации алгоритма кластеризации для района со сложной структурой данных, для областей моря с мелкими островами, закрытыми извилистыми бухтами, каналами. Сложность алгоритма формирования графа маршрута возрастает. Качество кластеризации определяется метрикой — мерой «схожести» объектов по наиболее значимым признакам. Исследование разношкальных метрик имеет особое значение для анализа многомерных данных. В этих случаях метрика строится на основе коэффициентов Гауэра [5], [6]. В настоящее время авторами работ [6] – [9] предложены различные варианты формирования разношкальных метрик. В навигации кластеризация выполняется по ряду навигационных параметров.

В данной работе ключевыми являются параметры глубины и расстояния между точками цифровой карты. На основе выполненной кластеризации осуществляется автоматизация формирования маршрута движения судна. Такой подход особенно актуален при осуществлении судоходства в районе мелководья, архипелагов, вдоль береговой черты.

Постановка задачи

1. Общая постановка задачи

Программное моделирование графа маршрута движения судна основано на кластеризации исходной цифровой базы данных района плавания. Разработанный алгоритм реализован для упрощенной цифровой модели данных, включающей отметки глубин и их географические координаты, мели и отметки высот.

Необходимо построить граф маршрута движения, используя результаты кластеризации данных района плавания, с учётом заданных начальной и конечной точек пути судна и безопасного минимального уровня глубин. Предлагается вершины графа формировать на основе кластеров глубин, а ребра графа строить таким образом, чтобы избежать избыточности возможных построений с учетом курса судна.

В такой постановке задача включает три основных этапа. Первый этап — выполнение кластеризации объектов (точек) исходной базы данных. Второй этап — формирование множества вершин графа на основе сформированных кластеров. Третий этап — формирование ребер графа на основе подмножества вершин графа. Последний этап самый сложный. Соединять полученные вершины произвольным образом или всеми возможными способами нельзя, так как в этом случае вместо модели маршрута движения судна получится нечто далекое от маршрута. Эта задача включает элементы «обучения» алгоритма тому, как и в каком порядке следует соединять вершины в зависимости от курса судна и его характеристик. Данная задача реализована в настоящее время на основе элементов эвристики, позволяющих формировать множество ребер графа наиболее приемлемым образом. Но в целом эта задача требует дальнейших исследований.

2. Постановка задачи кластеризации

Цифровая база данных (ЦБД) представлена матрицей $A = \{\varphi_i, \lambda_i, h_i, i = \overline{1, N}\}$, при $h_i > 0$ — задана глубина морского дна, при $h_i \leq 0$ — высота (суша), $0 < h_i \leq h_m$ — мели, h_m — предельная безопасная глубина.

Для точек ЦБД: $a_i = \{\varphi_i, \lambda_i, h_i\}$, $a_i \in A$, метрики μ_{c_k} — область моря и μ_{L_l} — область суши, проводят разбиение точек на непересекающиеся подмножества C_k (кластеры моря) и L_l (кластеры суши) так, чтобы каждый кластер состоял из точек, близких по метрике μ_{c_k} , а объекты разных кластеров существенно различались. При этом каждому объекту $a_i \in A$, $h_i > 0$ приписывается метка (номер) кластера C_k и каждому объекту $a_i \in A$, $h_i \leq 0$ — метка (номер) кластера L_l . Метрика кластеризации определена с учетом расстояния и разности глубин:

$$\mu_{c_k} = d_p \cdot \rho(\varphi_i^{c_k}, \lambda_i^{c_k}) + d_h \cdot |h_i^{c_k} - h_{c_k}|, \quad (1)$$

где d_p, d_h — коэффициенты по расстоянию и глубине (высоте); $\rho(\varphi_i^{c_k}, \lambda_i^{c_k})$ — расстояние между точкой и центроидом c_k ; (φ_i, λ_i) — координата точки $a_i \in A$ ЦБД; $(\varphi_{c_k}, \lambda_{c_k})$ — координата центроида $c_k \in C$; $C_k = \{\varphi_i, \lambda_i, h_i \mid h_i > 0, h_k > 0, \mu_{c_k} \rightarrow \min\}$ — кластеры моря; $L_l = \{\varphi_i, \lambda_i, h_i \mid h_i \leq 0, h_l \leq 0, \mu_{L_l} \rightarrow \min\}$ — кластеры суши.

Оптимальность разбиения объектов кластеризации на группы оценивается при помощи функционала качества кластеризации.

В качестве критерия качества кластеризации можно выбрать сумму средних внутрикластерных расстояний и сумму межкластерных расстояний.

Сумма средних внутрикластерных расстояний должна быть минимальной [3] – [9], т. е.

$$F_0 = \sum_{c \in C} \frac{1}{|C_k|} \sum_k m_c^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $C_k = \{a_i \in H \mid c_k = c\}$ — кластер с номером k .

Сумма межкластерных расстояний должна быть максимальной, т. е.

$$F_1 = \sum_{c \in C} \mu^2(\mu_c, \mu) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где μ — центр масс всей выборки.

При этом вычисляется отношение пары функционалов, чтобы учесть межкластерные и внутрикластерные расстояния

$$F_0 / F_1 \rightarrow \min. \quad (4)$$

На основе поставленной задачи реализован гибридный алгоритм кластеризации.

3. Постановка задачи формирования графа маршрута

Алгоритм построения графа $G = (V, E)$ маршрута включает три основных этапа.

На первом этапе для областей суши формируются дополнительно кластеры вдоль границы суши. При этом на данном этапе необходимо выполнить кластеризацию области суши для участков возможных маршрутов судна. Можно выполнить кластеризацию для данных, представляющих модель береговой черты, не формируя отдельно кластеры суши.

На втором этапе выполняется формирование классов K_1 и K_2 вершин графа на основе центроидов C_p , лежащих по разные стороны от прямой, соединяющей начальную S_0 и конечную S_1 точки заданного маршрута, где $K_1 = \{v_1^0, v_2^0, \dots, v_{n_1}^0\}$, $K_2 = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_{n_2}^1\}$, $K_1 \cap K_2 = \emptyset$; n_1 — число вершин класса K_1 ; n_2 — число вершин класса K_2 .

На третьем этапе выполняется формирование вершин и ребер графа возможных путей движения судна. Ребра графа формируются с учетом направления движения (предварительная сортировка центроидов на широте и долготе позволяют реализовать этот шаг). Сформированный граф $G = (V, E)$ маршрута записывается в файл данных в виде списка вершин и ребер графа.

Алгоритм кластеризации

Алгоритм кластеризации включает два основных этапа. На первом этапе происходит построение центроидов кластеров. Первоначально центроиды задаются на узлах регулярной сетки цифровой карты. Затем происходит оптимизация числа и положения центроидов на базе метрики (1). На втором этапе происходит кластеризация точек цифровой карты.

1. Этап оптимизации центроидов

Шаг 0. Считать данные из сформированного файла центроидов, где K — число центроидов.

Внешний цикл:

Шаг 1. Выбрать центроид C_i (первый раз $i = 0$), пока $i < N$.

Внутренний цикл:

Шаг 2. Выбрать центроид C_j (первый раз $j = i + 1$), пока $j < N$. Иначе перейти на шаг 6.

Шаг 3. Если расстояние по широте или долготе между центроидами c_j и c_i больше предельного Δd : $(\rho(\varphi_{c_i}^{c_j}, \lambda_{c_i}^{c_j}) - \Delta d) > 0$, и $|h_{c_i} - h_{c_j}| > \Delta h$, или глубины разного знака, то центроид c_j рекомендовано не изменять, в противном случае центроид c_j помечается на исключение.

Шаг 4. Исключить помеченный центроид c_j из множества центроидов C , соответственно пересчитать число кластеров K_1 (первоначально $K_1 = K$).

Шаг 5. Принять $j = j + 1$, перейти к шагу 2.

Внутренний цикл завершен.

Шаг 6. Принять $i = i + 1$ и перейти на шаг 2 пока $j < K$.

Внешний цикл завершен.

Шаг 7. Сформировать файл центроидов.

2. Этап кластеризации точек ЦКГ

Шаг 0. Выбрать начальную точку ЦКГ a_i , $i = 0$.

Внешний цикл: Шаг 1. Переход по точкам a_i карты (области моря C или суши L) пока $i < N$.

Внутренний цикл: Шаг 2. Переход по центроидам c_k (L_i) пока $k < K_1$.

Шаг 3. Вычислить значение метрики (1). Принять за минимум значение метрики.

Шаг 4. Перейти к следующему центроиду c_{k+1} (L_{i+1}). Вычислить метрику. Если значение метрики меньше полученной ранее, принять за минимум. Перейти на шаг 2.

Внутренний цикл завершен.

Шаг 5. Отнести точку a_i карты к кластеру C_k (L_i) с минимальной метрикой.

Шаг 6. Если величина метрики больше порогового значения, то данная точка образует свой собственный кластер (отличные значения глубины).

Шаг 7. Принять $i = i + 1$, перейти на шаг 1.

Внешний цикл завершен.

Шаг 8. Повторить шаги 1 – 7 для другой области (моря C или суши L).

Шаг 9. Вычислить критерии качества — условия (2) – (4).

Шаг 10. Вычислить центр группирования точек μ_i для каждого кластера C_i , среднюю величину глубины (или высоты) и выполнить перенос центра кластера C_i в заданную точку μ_i .

Шаг 10. Вычислить критерии качества F_0 , F_1 и отношение данных критериев. Принять решение: продолжить итерации или останов. В случае продолжения процесса кластеризации перейти на шаг 1. Иначе кластеризация закончена.

Результаты реализации алгоритмов

Разработанные алгоритмы кластеризации и формирования графа маршрута судна реализованы программно на языке программирования C++ в среде программирования Visual Studio на платформе .NET Framework. Кластеризация точек ЦБГ позволяет выполнить анализ района плавания для планирования маршрута перехода из начальной S_0 точки в конечную точку S_1 , с учетом среднего уровня глубин и мелей. Цифровая база глубин района плавания представлена в виде регулярной сетки отметок глубин (совместно с координатами точек) и высот. На рис. 1 отображена структура кластеров для района около о. Хоккайдо. Данный район выбран как пример сложной

структуры данных: извилистая береговая черта, наличие мелких островов и отмелей. На рисунке показаны кластеры глубин, центры кластеров выделены светлым тоном, серым цветом указаны средние значения глубин для центров кластеров.

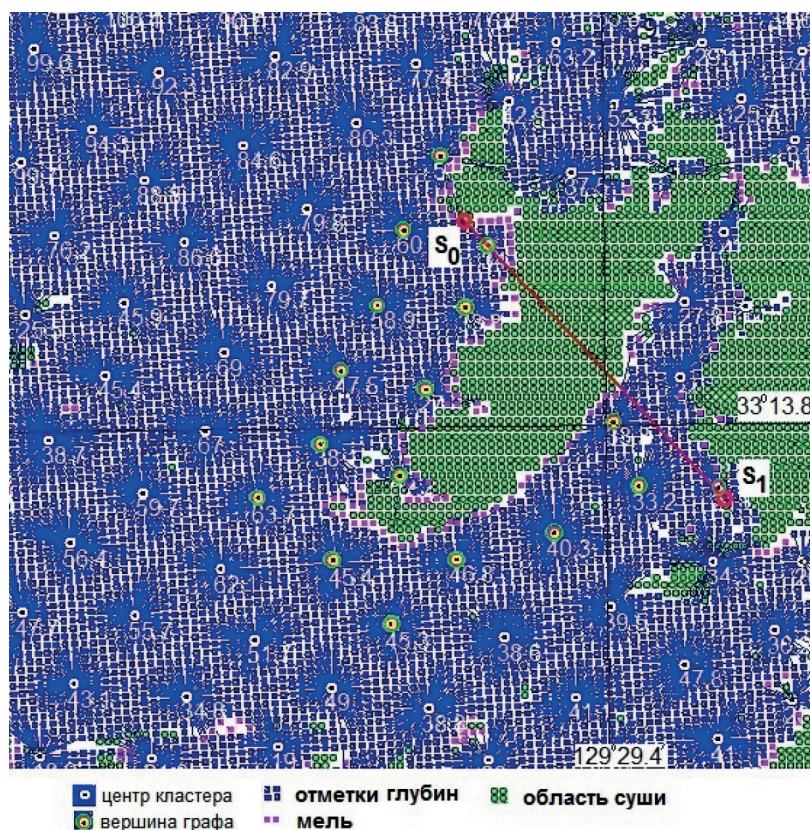


Рис. 1. Формирования вершин графа маршрута на основе кластеров

Радиус кластеров зависит от значений коэффициентов метрики (1). Полученное число кластеров зависит от числа точек района плавания и размеров района, и шага сетки.

В таблице приведены критерии качества кластеризации, которые определены в соответствии с формулами (2) – (4) для соответствующих значений коэффициентов метрики для районов Амурского и Уссурийского заливов и района около о. Хоккайдо.

Таблица

Параметры кластеризации

Район плавания	Размер района, широта × долгота, м. м.	Число точек	Число кластеров	Коэффициенты метрики	Значение критерия качества кластеризации F_0/F_1
Амурский залив	5,7 × 6	180	11	$d_p = 0,25;$ $d_h = 1,95$	0,3134
			12	$d_p = 0,25;$ $d_h = 0,75$	0,3216
			33	$d_p = 0,55;$ $d_h = 0,75$	0,2975
			50	$d_p = 0,75;$ $d_h = 0,25$	0,2829
			139	$d_p = 1,75;$ $d_h = 0,55$	0,0195

Таблица
(Окончание)

Район около о. Хоккайдо	60 × 60	12952	59	$d_p = 0,25;$ $d_h = 1,95$	0,8934
			59	$d_p = 0,25;$ $d_h = 0,75$	0,8522
			113	$d_p = 0,55;$ $d_h = 0,75$	0,7528
			148	$d_p = 0,75;$ $d_h = 0,25$	0,7438
			434	$d_p = 1,75;$ $d_h = 0,55$	0,7276
Уссурийский залив	50 × 89	11322	85	$d_p = 0,25;$ $d_h = 1,95$	1,057
			85	$d_p = 0,25;$ $d_h = 0,75$	0,8252
			88	$d_p = 0,55;$ $d_h = 0,75$	0,776
			158	$d_p = 0,75;$ $d_h = 0,25$	0,7206
			376	$d_p = 1,75;$ $d_h = 0,55$	0,687

Из приведенных расчетов видно, что с ростом величины d_p/d_h значение критерия качества кластеризации уменьшается. Для целей кластеризации в данной задаче необходимо в первую очередь учесть значения глубин и затем расстояние между точками при оптимальном соотношении коэффициентов меры близости по расстоянию и разности глубин. В соответствии с формулами (2) – (4), наиболее близки к оптимальным значениям коэффициенты $d_p = 0,55$; $d_h = 0,75$. Расчеты показывают, что данные результаты дают наилучшую кластеризацию в соответствии со значением критерия качества кластеризации.

Моделирование графа маршрута на базе кластеров

После того как сформированы вершины графа, все множество вершин делится на два класса. Первый класс включает множество вершин, лежащих над прямой соединяющей начальную и конечную точки, второй класс включает точки, расположенные под прямой (либо слева и справа от прямой). В каждом из подмножеств выполняется сортировка координат по смещению широт к точке S_1 . Сортировка позволяет выполнить выбор вершин (центроидов) для формирования ребер в порядке следования в файле данных, при движении сверху вниз (соответственно курсу судна), либо снизу вверх. Для каждой пары вершин формируется ребро, связывающее эти вершины. В результате построения формируется граф, представленный на рис. 2.

На рис. 2 показан один из возможных вариантов построения графа пути на основе последовательно сформированных вершин графа. Данный вариант даёт неприемлемый результат. Возможен вариант формирования ребер всеми возможными способами с последующей оптимизацией числа ребер на основе выбора кратчайших путей среди трех, четырех и далее вершин так, чтобы сформированные ребра не пересекали границу суши и мелей. В результате получается граф, представленный на рис. 3.

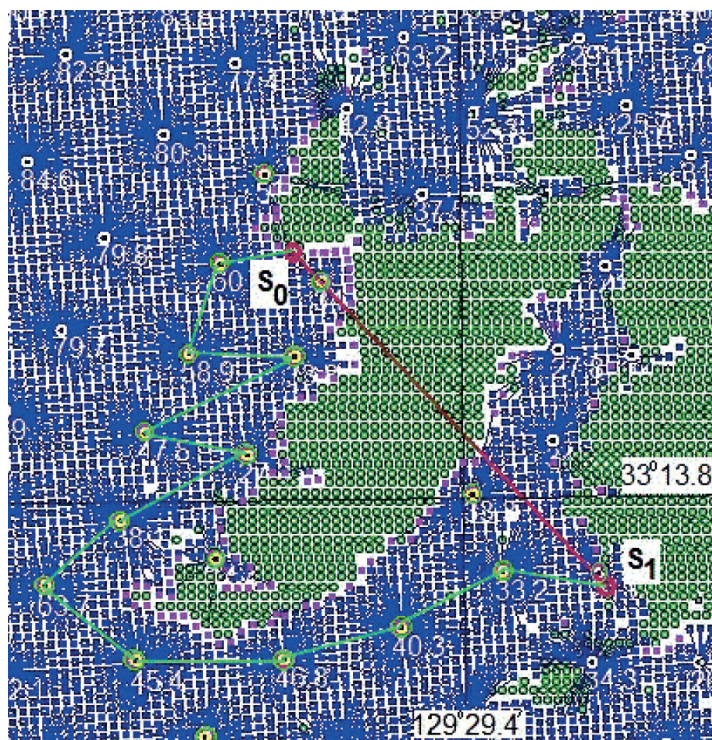


Рис. 2. Вариант последовательного формирования ребер графа

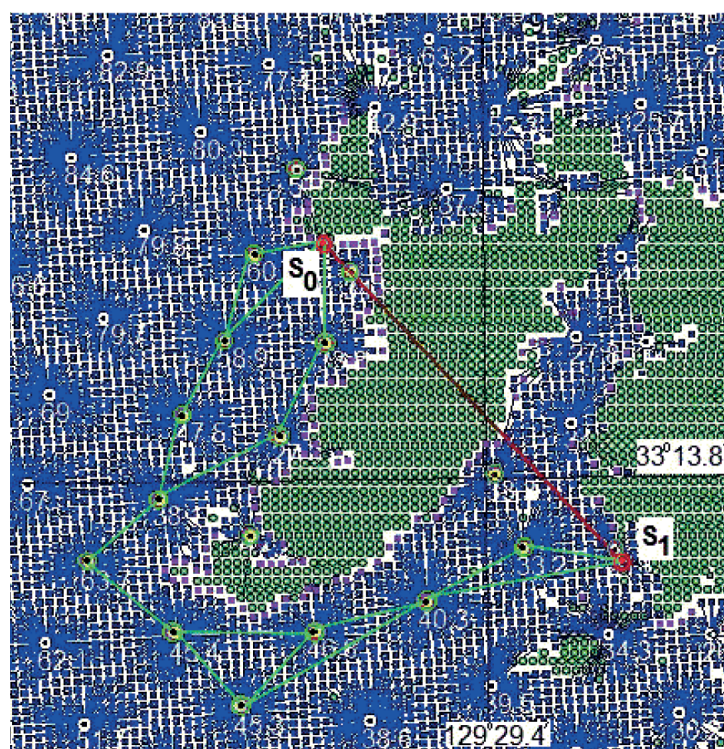


Рис. 3. Вариант выбора кратчайших промежуточных ребер

Граничные точки области суши формируют «зону обхода» вокруг суши. На данном этапе возможно применение классического алгоритма обхода «A-Search» [10], но предложенный метод обхода областей суши на основе сформированных центроидов по границе суши позволяет эффективно с небольшими вычислительными затратами реализовать построение вершин графа.

Программная реализация описанных алгоритмов требует предварительного формирования ограниченных по числу точек цифровых массивов данных [11], так как реализованные алгоритмы требуют больших вычислительных затрат в использовании оперативной памяти. Для больших акваторий моря кластеризация выполняется поэтапно, для каждого участка. Дополнительно, на этапе поиска кратчайшего пути для группы связанных компонент кластеров наиболее эффективно использовать эвристические оценочные функции. Подход поиска кратчайших путей на основе эвристик для уже сформированного графа представлен в работах [12], [13].

Выводы

Разработанный алгоритм кластеризации позволяет выполнить классификацию точек электронной навигационной карты, включающей район плавания, на непересекающиеся подмножества кластеров, содержащих объекты «схожих» по метрике кластеризации. В работе представлена реализация алгоритма на примере сложного района плавания. Изменение значений коэффициентов позволяет изменять размеры кластеров в зависимости от целей реализации алгоритма и характеристик района плавания.

Предложенный алгоритм формирования графа маршрута позволяет строить сеть возможных маршрутов, которая охватывает область, находящуюся не только вдоль кратчайшего маршрута перехода, но и смежные районы, что является важным при поиске оптимального маршрута по расстоянию, по времени прохождения и безопасности маршрута. Кластеризация позволяет значительно сокращать объем вычислений и получать возможные решения. Изменение функционала метрики позволит строить маршруты, ориентируясь не только на глубину, но и на иные параметры судоходства.

Дальнейшие исследования возможности применения кластерного анализа для целей судовождения должны включать этапы анализа погрешностей вычислительных алгоритмов. Еще одно направление исследований связано с включением в алгоритмы кластеризации и формирования маршрута движения судна гидрометеорологических факторов и учета критериев безопасности судовождения. Следующее направление дальнейших исследований и совершенствования математического и программного обеспечения для автоматизированной информационной телекоммуникационной системы управления и навигации морских судов [14] направлено на разработку интеграции с современными электронными навигационно-информационными картографическими системами [1], [2] и новыми методами обработки и представления геоинформации, визуализации навигационной графической информации [15], [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобастов В. М. Электронные картографические системы в судовождении: учеб. пособие / В. М. Лобастов. — Владивосток: Изд-во МГУ им. Г. И. Невельского, 2009. — 167 с.
2. Вагущенко Л. Л. Судовые навигационно-информационные системы: учеб. пособие / Л. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2004. — 302 с.
3. Ключева С. Ф. Моделирование маршрута движения судна на основе алгоритмов кластеризации / С. Ф. Ключева, А. Д. Акмайкин, П. А. Салюк // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. National Research University Higher School of Economics. Russia, Moscow, May 12 – 14, 2016. — IEEE Catalog Number: CFP13794. — CDR.
4. Ключева С. Ф. Применение алгоритмов кластеризации в задачах навигации по глубинам морского дна / С. А. Ключева // Евразийское научное объединение. — 2016. — Т. 1. — № 4 (16). — С. 4–9.
5. Gower J. C. A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties / J. C. Gower // Biometrics. — 1971. — Vol. 27. — No. 4. — Pp. 857–871. DOI: 10.2307/2528823.
6. Ali B. B. K-means clustering based on gower similarity coefficient: A comparative study / B. B. Ali, Y. Massmoudi // Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2013 5th International Conference on. — IEEE, 2013. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICMSAO.2013.6552669.
7. Atev S. Clustering of vehicle trajectories / S. Atev, G. Miller, N. P. Papanikolopoulos // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2010. — Vol. 11. — Is. 3. — Pp. 647–657. DOI: 10.1109/TITS.2010.2048101.

8. Savchuk T. O. Information technology of clustering problem situations in computing and office equipment / T. O. Savchuk, S. I. Petrishyn, P. Kisała, B. Imanbek, S. Smailova // 16th Conference on Optical Fibers and Their Applications. — International Society for Optics and Photonics, 2015. — Pp. 98161W-98161W-8. DOI:10.1117/12.2229126.

9. Бирюков А. С. Решение задач кластерного анализа коллективами алгоритмов / А. С. Бирюков, В. В. Рязанов, А. С. Шмак // Вычислительная математика и математическая физика. — 2008. — Т. 48. — № 1. — С. 176–192.

10. Goldberg A. V. Computing the shortest path: A-search meets graph theory / A. V. Goldberg, C. Harrelson // Proceedings of the sixteenth annual ACM — SIAM symposium on Discrete algorithms. — Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. — Pp. 156–165.

11. Поляков И. В. Алгоритмы поиска путей на графах большого размера / И. В. Поляков, А. А. Чеповский, А. М. Чеповский // Фундаментальная и прикладная математика. — 2014. — Т. 19. — № 1. — С. 165–172.

12. Akmaykin D. A. Optimization of the search algorithm for the shortest route / D. A. Akmaykin, S. F. Klyueva, O. A. Bukin, P. A. Salyuk // “Stability and Control Processes” in Memory of VI Zubov (SCP), 2015 International Conference. — IEEE, 2015. — Pp. 545–548.

13. Акмайкин Д. А. Эвристический поиск оптимального маршрута судна по Северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62.

14. Акмайкин Д. А. Проект системы оперативного анализа и оптимизации движения морских судов / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 229–236.

15. Фирсов Ю. Г. Основные требования к обеспечению качества современной батиметрической (топографической) съемки / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 171–179.

16. Фирсов Ю. Г. Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.

RESULTS OF RESEARCHING THE PROBLEM OF FORMING A GRAPH OF VESSEL'S ROUTE ON THE BASIS OF ALGORITHMS OF CLUSTERING

The class of problems associated with the forming of the graph, the construction of its vertices and edges on the basis of specified conditions and a large number of source data is relevant for researchers in the modern theory of graphs. These problems belong to the class of unrealizable tasks. To solve such problems of artificial intelligence methods, cluster analysis, and the use of heuristic and evolutionary algorithms in conjunction with the new computer is the most effective technology. The task of forming a graph of the route the ship movement belongs to a class of such problems. Heuristic is the possibility of using the results of the clustering of the original digital database as a basis for the formation of vertices and edges of the graph. This problem is the subject of the article. The digital database of navigation area includes the depths, heights and shallows. The proposed method of clustering is, based on the metric that takes into account the distance between points on the map and difference of depth. Numerical values of clustering parameters and calculating numeric values of clustering criterion of quality metrics for different values of the coefficients are shown. The result of work, in details described designed and implemented in software clustering algorithm. The software simulation results of the algorithm in the area characterized by a winding coastline, the headlands, shoals, bays and inlets, as well as the distribution of the islands in the area of construction of the route was presented. On the base of the clustering performed formation graph tracks the vessel route. Shown an algorithm for constructing the vertices and edges of the graph. The programme allowed visualizing the original digital database and the results a graph of vessel's route. In conclusion, given the necessary basic directions for further research.

Keywords: clustering, metrics, clustering validity, vessel's route, electronic navigational chart.

REFERENCES

1. Lobastov, V. M. *Elektronnye kartograficheskie sistemy v sudovozhdenii: uchebnoe posobie*. Vladivostok: Mor. gos. Un-t, 2009.

2. Vagushenko, L. L. *Sudovye navigacionno — informacionnye sistemy: uchebnoe posobie*. Odessa: Feniks, 2004.
3. Klyueva, S. F., D. A. Akmaykin, and P. A. Salyuk. "Modeling a graph of vessel's route on the basis of algorithms of clustering." *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. National Research University Higher School of Economics. Russia, Moscow, May 12 — 14, 2016*. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR.
4. Kljueva, S. F. "Primenenie algoritmov klasterizacii v zadachah navigacii po glubinam morskogo dna." *Evrazijskoe nauchnoe obiedinenie* 1.4(16) (2016): 4–9.
5. Gower, J. C. "A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties." *Biometrics* 27.4 (1971): 857–871. DOI: 10.2307/2528823.
6. Ali, Bilel Ben, and Youssef Massmoudi. "K — means clustering based on gower similarity coefficient: A comparative study." *Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2013 5th International Conference on*. IEEE, 2013. DOI: 10.1109/ICMSAO.2013.6552669.
7. Atev, Stefan, Grant Miller, and Nikolaos P. Papanikolopoulos. "Clustering of vehicle trajectories." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 11.3 (2010): 647–657. DOI: 10.1109/TITS.2010.2048101.
8. Savchuk, T. O., S. I. Petrishyn, P. Kisała, B. Imanbek, and S. Smailova. "Information technology of clustering problem situations in computing and office equipment." *16th Conference on Optical Fibers and Their Applications*. International Society for Optics and Photonics, 2015. DOI:10.1117/12.2229126.
9. Birjukov, A. S., V. V. Rjazanov, and A. S. Shmak. "Reshenie zadach klasterного analiza kollektivami algoritmov." *Vychislitel'naja matematika i matematicheskaja fizika* 48.1 (2008): 176–192.
10. Goldberg, Andrew V., and Chris Harrelson. "Computing the shortest path: A search meets graph theory." *Proceedings of the sixteenth annual ACM — SIAM symposium on Discrete algorithms*. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005: 156–165.
11. Polyakov, I. V., A. A. Chepovskiy, and A. M. Chepovskiy. "Algorithms for searching paths in huge graphs." *Journal of Mathematical Sciences* 19.1 (2014): 165–172.
12. Akmaykin, Denis A., S. F. Klyueva, O. A. Bukin, and P. A. Salyuk. "Optimization of the search algorithm for the shortest route." "Stability and Control Processes" in Memory of VI Zubov (SCP), *2015 International Conference*. IEEE, 2015: 545–548.
13. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62.
14. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Operational system design analysis and optimization of maritime traffic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 229–236.
15. Firsov, Yu. G. "The main requirements for the bathymetric (topographic) surveying quality control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 171–179.
16. Firsov, Yu. G., and I. V. Kozhukhov. "The new three dimensional visualization techniques for bathymetric engineering survey." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 17–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Акмайки́н Де́нис Алекса́ндрович —
кандидат физико-математических наук, доцент.
МГУ им. адм. Г.И. Невельского
akmaykin@msun.ru
Клю́ева Светла́на Фе́доровна —
кандидат технических наук.
МГУ им. адм. Г.И. Невельского
klsvetlkl@gmail.com
Салю́к Па́вел Анато́льевич —
кандидат физико-математических наук.
ТОИ ДВО РАН
pavel.salyuk@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akmaykin Denis Aleksandrovich —
PhD, associate professor.
Maritime State University named after
admiral G.I.Nevelskoi
akmaykin@msun.ru
Klyueva Svetlana Fedorovna — PhD.
Maritime State University named after
admiral G.I.Nevelskoi
klyueva@msun.ru
Salyuk Pavel Anatolievich — PhD.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
pavel.salyuk@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25 июля 2016 г.