

УДК 519.68:15:681.5

В. М. Гриняк

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток, Россия

Планирование маршрутов судов на основе кластеризации ретроспективных данных трафика акватории

Статья посвящена проблеме обеспечения безопасности движения судов на морских акваториях. Одним из элементов организации движения в районах интенсивного судоходства является система установления путей движения судов, которая представляет собой набор ограничений, накладываемых определённой схемой движения судов, правилами движения, принятыми на конкретной акватории. Суды, нарушающие правила движения на акватории, с точки зрения классических представлений могут не представлять опасности в настоящий момент, однако способны привести к трудноразрешимой опасной навигационной ситуации через некоторое время. В работе рассматривается задача планирования маршрута перехода судна через акватории с интенсивным движением. Задача актуальна в свете перспективного развития беспилотных морских транспортных средств. При движении через акватории с установленными путями планирование маршрута перехода судна следует осуществлять с учётом заданных ограничений. Возможным путём идентификации этих ограничений является выделение паттернов движения конкретной морской акватории из ретроспективной информации о её трафике. Модельные представления такой задачи могут быть сформулированы на основе идеи о кластеризации параметров движения судов. В основу модели задачи планирования маршрута положен поиск кратчайшего пути на взвешенном графе. Предлагается несколько способов построения такого графа: регулярная сетка вершин и рёбер, слоистая сетка вершин и рёбер, случайная сетка вершин и рёбер, вершины и рёбра на основе ретроспективных данных. Вес ребер предлагается задавать как функцию «желательности» того или иного курса судна для каждой точки акватории с учётом выявленных паттернов движения. Для этого акватория разбивается на участки и для каждого из

Гриняк Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных технологий и систем; e-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru

них выполняется кластеризация курсов и скоростей. В работе обсуждаются возможные методы кластеризации, делается выбор в пользу субтрактивной кластеризации, не требующей предварительного задания количества кластеров. Источником данных о трафике акватории могут служить сервисы Автоматической идентификационной системы. В работе показана возможность использования данных АИС, доступных на специализированных интернет-ресурсах. Несмотря на «разреженность» этих данных, они хорошо отражают сводные особенности трафика акваторий. В работе приведены примеры планирования маршрутов перехода через Токийский залив.

Ключевые слова и словосочетания: безопасность судоходства, планирование маршрута, система установления путей движения судов, кластеризация, АИС.

V.M. Grinyak

Vladivostok State University of Economics and Service

Vladivostok, Russia

Vessel route planning based on traffic historical data clustering

This work is about navigation safety of marine traffic at sea areas. One of the elements of traffic management in areas of heavy navigation is the system for establishing the ship routes. It is a set of restrictions imposed by a certain ship traffic pattern, traffic rules adopted in a particular water area. Ships that violate the rules of movement in the water area, from the point of view of classical concepts, may not present a danger now. However, vessels can lead to an intractable dangerous navigation situation after a while. The navigational safety of vessels can only be ensured if they follow a certain traffic pattern in conditions of heavy traffic. The paper considers the problem of planning a route for a vessel to cross water areas with heavy traffic. It should be borne in mind that the trajectory of the vessel should be consistent with established navigational practices and collective navigation experience. Isolation of established patterns of movement of a specific sea area from retrospective information about its traffic by clustering the parameters of vessel movement is a promising way to identify such an experience. The task is considered relevant due to the promising development of unmanned marine vehicles. Ship's passage routes planning passage should be carried out considering the specified restrictions when moving through the water areas with established routes. Isolation of patterns of movement of a specific marine area from retrospective information about its traffic is a possible way of identifying these restrictions. Model representations of such a problem can be formulated based on the idea of clustering the parameters of ship traffic. The model of the route planning problem is based on finding the shortest path on a weighted graph. There are several ways to construct such a graph: a regular mesh of vertices and edges, a layered mesh of vertices and edges, a random mesh of vertices and edges, vertices and edges based on historical data. The weight of the ribs is proposed to be set as a function of the "desirability" of a particular course of the vessel for each point of the water area, considering the identified movement patterns. The water area is divided into sections and for each of them clustering of rates and velocities is performed. Possible clustering methods are discussed in the paper, and a choice is made in favor of subtractive clustering, which does not require preliminary specification of the number of clusters. Services of the Automatic Identification System can serve as a source of data on water area traffic. The

paper shows the possibility of using AIS data available on specialized Internet resources. These data reflect well the summary features of the water area traffic despite their "sparseness". The historical AIS data of sea traffic at Tokyo bay is used for identifying traffic schema and ship routes planning with the model designed under presented research.

Keywords: navigation safety, route planning, ship track system, clustering, AIS.

Введение

Обеспечение безопасности движения судов в условиях интенсивного трафика представляет собой актуальную комплексную научную и прикладную проблему, в рамках которой хорошо известна задача планирования маршрута перехода с целью оптимизации движения (например, плавание за кратчайшее время, по кратчайшему из возможных путей и т.п.) [2; 4; 13].

От особенностей трафика по пути следования судна зависит выбор маршрута. Так, на акваториях с интенсивным движением часто вводится система установления путей движения судов, представляющая собой набор ограничений, накладываемых схемой движения судов («правилами движения»), принятой на конкретной акватории [12; 15]. Указанная схема движения может быть принята как директивно, так и неявно (неформально): как квинтэссенция коллективного опыта судоходства в конкретном районе. При движении судна через такие районы планирование маршрута перехода необходимо осуществлять с учётом накладываемых ограничений. Перспективным путём их идентификации является выделение устоявшихся паттернов движения конкретной морской акватории из ретроспективной информации о её трафике на основе идеи о кластеризации параметров движения судов [7].

В основу математической модели задачи планирования маршрута может быть положен поиск кратчайшего пути на взвешенном графе возможных маршрутов судна (такой подход является традиционным и хорошо себя зарекомендовавшим в рассматриваемом классе задач [3; 6; 25]). Вес рёбер графа определяется «желательностью» того или иного курса судна для каждой точки акватории с учётом выявленных паттернов движения. В результате выбирается наиболее «типичный» (а значит, и безопасный) для выбранной акватории маршрут судна.

Рассматриваемая задача планирования маршрутов судов на основе информации о характерном движении представляется актуальной в том числе в свете перспективного развития беспилотного судоходства [11; 16].

Основные модельные представления

Рассмотрим систему координат xu , где ось абсцисс x соответствует географической долготе, а ось ординат y – географической широте судна. Пусть в каждой точке акватории заданы скорость v и курс k судна. Введём для каждой точки акватории функцию желательности параметров движения $u(x, y, k, v)$. Тогда желательность движения судна по маршруту, задаваемому некоторой кривой q , может быть выражена криволинейным интегралом первого рода:

$$U = \int_q u(x, y, k, v) dq .$$

Для вычисления этого интеграла его удобно представить в виде:

$$U = \int_q u(x, y) dq = \int_{t_1}^{t_2} u(x, y, k, v) \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt,$$

где $\dot{x} = dx/dt$ и $\dot{y} = dy/dt$ – скорости изменения долготы и широты судна при его движении, зависящие, в свою очередь, от координат, курса и скорости судна; t_1 и t_2 – время начала и окончания движения судна по кривой q .

Примем, что из множества возможных маршрутов оптимальной является та кривая q_* , которая обеспечивает минимум функционала U , так что

$$q_* = \arg \min_q U(q).$$

Непосредственное решение последней задачи возможно методами вариационного исчисления и уравнений математической физики, однако на практике его нахождение нецелесообразно из-за высокой вычислительной сложности и, как правило, дискретности сетки аргументов функции $u(x, y, k, v)$. Популярным эвристическим упрощением задачи является её модельная интерпретация поиском кратчайшего пути на взвешенном графе возможных маршрутов судна [14].

Рассмотрим подходы к построению такого графа.

Регулярная сетка вершин. Разбиение акватории на квадратные участки. Разобьём акваторию на множество квадратных участков. На участках, в которых допустимо движение судна, выделим точки центров квадратов. Примем, что эти точки образуют множество вершин графа возможных маршрутов судна. Одна из них соответствует точке начала движения судна, другая – конечной точке маршрута. Множество рёбер такого графа может задаваться соединением вершин по принципу «каждая с каждой», исключая рёбра, проходящие по недопустимым для движения участкам. Также для уменьшения числа рёбер графа следует ввести дополнительное условие их максимальной длины. Недостатком такого графа является отсутствие ограничений на величину изменения курса судна в точках вершин, что может породить неудобные или вообще не реализуемые маршруты.

Регулярная сетка вершин. Слоистое разбиение акватории. Введём множество из N точек p_i . Пусть одна из точек – p_1 – соответствует точке начала движения судна, и одна из точек – p_N – конечной точке маршрута. Пусть множество возможных маршрутов судна лежит внутри квадрата со стороной, равной длине отрезка с вершинами в начальной и конечной точках маршрута (p_1 и p_N соответственно). При этом точка p_1 лежит в середине стороны квадрата, а точка p_N – в середине противоположной стороны (то есть отрезок $p_1 p_N$ делит квадрат пополам). Заполним этот квадрат точками так, чтобы они образовывали правильную прямоугольную сетку. Назовём вершины

графа, лежащие на отрезках, перпендикулярных отрезку $p_1 p_N$, слоями вершин. Положим, что при движении судна возможны переходы только от одного слоя вершин к следующему ближайшему слою, а движения между вершинами одного слоя или между вершинами далеко отстоящих слоёв запрещены. Исключаются рёбра, проходящие по недопустимым для движения участкам. Также следует ограничить максимальную длину ребра. Такое представление графа учитывает судоводительскую специфику движения – неявно ограничивает величину изменения курса.

Случайная сетка вершин. Возьмём за основу описанное выше разбиение акватории на квадратные участки. Пусть задана вероятность $P(x, y)$ того, что точка центра квадратов с координатами x, y есть вершина графа возможных маршрутов судна. Эта вероятность может быть одинаковой для всей акватории, а может быть различной для разных участков, например, увеличиваться в местах пересечения судопотоков и на участках характерного изменения курсов. При вырожденном случае $P(x, y) \equiv 1$ множество вершин совпадёт с регулярной сеткой. Множество рёбер графа задаётся так же, как для разбиения на квадратные участки. Проблемой случайной сетки вершин является трудность формального обоснования функции $P(x, y)$. Представляется, что она может быть задана лишь эвристическим способом. Кроме того, различные реализации графа возможных маршрутов при его случайном формировании могут приводить к существенно различным результатам поиска наилучшего маршрута. С другой стороны, после нескольких реализаций возможен последующий выбор «окончательного» наилучшего маршрута по какому-либо критерию.

Сетка вершин на основе ретроспективных данных. Пусть имеются данные о движении судов на выбранной акватории за некоторый период времени в виде множества кортежей величин долготы, широты, скорости и курса судна. Зададим множество вершин графа возможных маршрутов на основе данных этого множества. При этом возможны два основных варианта: множество вершин графа формируется на основе полного множества данных о координатах судов или выбирается только часть множества, как, например, в описанном подходе со случайной сеткой вершин. Множество рёбер графа может задаваться так же, как при разбиении на квадратные участки, либо формироваться на основе данных о движении, если известны подмножества кортежей, относящихся к одной траектории. В последнем случае его следует дополнить и «нереализованными» вариантами рёбер для обеспечения связности графа. Достоинством такого подхода является формирование возможных маршрутов судов, характерных для конкретной акватории. К недостаткам относят трудность формального обоснования интервала времени, за который берутся данные о движении. Представляется, что выбирать его следует эвристическим способом.

Рассмотрим подходы к заданию веса рёбер графа возможных маршрутов. Примем, что в отсутствие данных о движении судов вес ребра равен длине дуги большого круга, соединяющей инцидентные ребру вершины. Если име-

ются данные о движении судов, вводится весовой коэффициент каждого ребра $a \in [0, 1]$, задаваемый одним из следующих способов:

Учёт числа судов с близким курсом и скоростью. Пусть имеются ретроспективные данные о движении судов (множество кортежей величин долготы, широты, скорости и курса) в некоторой окрестности выбранного ребра. Задаваясь соответствующим ребру курсом и предполагаемой скоростью, подсчитаем количество m «близких» (то есть лежащих в некотором интервале курсов и скоростей) векторов скорости судов в окрестности выбранного ребра. Весовой коэффициент ребра принимается равным $a = 1/m$. Таким образом, ребро будет тем легче (и, соответственно, предпочтительнее при планировании маршрута), чем больше судов ранее двигалось по соответствующей ему траектории. Возможен подсчёт m только на данных о курсе, без учёта предполагаемой скорости судна. Недостатком такого подхода является учёт всех судов, находившихся в окрестности ребра, без учёта их маршрутов. Это способно привести к тому, что планируемый маршрут пройдёт по самым «популярным» рёбрам, даже если они не являются предпочтительными в конкретном случае.

Учёт характерных значений курса и скорости. Для исключения эффекта «популярности» следует определить «характерность» значений курсов и скоростей без явного учёта числа судов, их реализующих. Здесь оказывается продуктивной идея кластеризации. Пусть по ретроспективным данным определено множество характерных значений вектора скорости судов, находящихся в окрестности выбранного ребра, – кластеров значений вектора скорости. Задаваясь соответствующим ребру курсом и предполагаемой скоростью, определим, принадлежит ли указанный вектор скорости одному из кластеров: в этом случае весовой коэффициент ребра a задаётся малым (например, $a = 0.1$). Таким образом, при планировании маршрута предпочтение получают те рёбра, которые соответствуют характерному движению. Также возможно определение кластеров только на основе данных о курсе, без учёта предполагаемой скорости судна.

Рёбра на основе ретроспективных данных. Этот способ определения весов рёбер может применяться в случае, если сетка вершин формируется на основе ретроспективных данных (см. выше). Для рёбер, сформированных на основе данных о движении, весовой коэффициент ребра задаётся малым (например, $a = 0.1$). Для тех рёбер, которые дополняют исходное множество, делая граф связным, весовой коэффициент принимается большим (например, $a = 1$). Таким образом, предпочтительными становятся уже реализованные маршруты.

При небольшом числе вершин и рёбер графа возможных маршрутов судна поиск кратчайшего пути может осуществляться известными детерминированными алгоритмами (Дейкстры, Беллмана-Форда и др.). Сложность наиболее эффективных из них пропорциональна числу рёбер и числу вершин (или их логарифму). Если для формирования графа использовать большие выборки ретроспективных данных, число вершин и рёбер может оказаться чрезмерно велико для продуктивной работы детерминированных алгоритмов. В

этом случае перспективны эвристические алгоритмы: муравьиные и генетические.

Совокупность свойств рассмотренных подходов к построению графа возможных маршрутов судна позволяет предположить, что слоистое разбиение акватории регулярной сеткой вершин является наиболее подходящим для рассматриваемой задачи планирования маршрута через акватории с интенсивным движением. Оно хорошо зарекомендовало себя и в других задачах [1; 6; 17]. Вес ребер задаётся с учётом характерных значений курса и скорости, определённых путём кластеризации параметров движения.

В основу идеи кластеризации положено выделение подмножеств объектов (кластеров), близких друг к другу по своим характеристикам. Существует два типа кластеров: кластеры – области связности и кластеры – «сгустки». В первом случае выделяются подмножества «похожих» друг на друга объектов, существенно отличающихся от остальных объектов множества. Во втором случае выделяются объекты с «самыми типичными» характеристиками, принимаемые за центры кластеров; остальные объекты относят к соответствующим подмножествам, если они «похожи» на выделенные центры.

В обоих случаях кластеризация проводится на определённой метрике – функции, задающей степень близости («расстояние») между объектами [18; 19; 28]. В рассматриваемой задаче эту метрику расстояния D_{12} между объектами 1 и 2 можно ввести следующим образом:

$$D_{12}^2 = w_{lon}(x_1 - x_2)^2 + w_{lat}(y_1 - y_2)^2 + w_{speed}(v_1 - v_2)^2 + w_{course}(k_1 - k_2)^2,$$

где w_{lon} , w_{lat} , w_{speed} , w_{course} – весовые коэффициенты, подбор которых осуществляется исходя из представлений о характерных размерах кластеров по каждому из измерений.

Так, по курсу характерные размеры могут составлять 5-10 градусов, по скорости – 2-3 метра в секунду. Функция разности курсов $k_1 - k_2$ доопределяется с учётом периодичности данных по углу. Определение весов по координатам w_{lon} , w_{lat} – это нетривиальная задача, поскольку на акватории могут встречаться как участки маневренного движения размером несколько сотен метров, так и зоны длительного равномерного движения в несколько десятков километров. Поэтому для некоторых приложений (в том числе, для рассматриваемой задачи) можно прибегнуть к декомпозиции: осуществлять кластеризацию на отдельных выделенных участках акватории только по скорости и/или курсу.

Для оценки характерных значений курса и скорости представляется подходящей кластеризация второго типа, где такие значения и выступают центрами кластеров. Из множества алгоритмов хорошо зарекомендовали себя горная и субтрактивная кластеризация, не требующие задания количества кластеров [28]. Алгоритм горной кластеризации состоит в следующем. Пусть имеются множе-

ство из M объектов и матрица расстояний D_{ij} , задающая степень близости между объектами с индексами i и j . Примем, что возможными центрами кластеров являются сами объекты. Для каждого из них рассчитывается значение потенциала, показывающего возможность формирования кластера в его окрестности:

$$p_i = \sum_{j=1}^M \exp(-\alpha D_{ij}),$$

где α – число, характеризующее масштаб расстояний D_{ij} , $\exp()$ – оператор экспоненты. На первом шаге алгоритма рассчитывают потенциал p_i каждого объекта и выбирают объект с наибольшим потенциалом; этот объект (пусть его индекс равен \max_1) считают центром первого кластера. На втором шаге пересчитывают значения потенциалов всех объектов так, чтобы исключить влияние потенциала уже найденного кластера – от текущих значений потенциала p_i вычитают вклад центра найденного кластера по формуле:

$$p_i^{(2)} = p_i - p_{\max_1} \exp(-\beta D_{i \max_1}),$$

где β – число, характеризующее размер кластеров.

Центр второго кластера – это точка с индексом \max_2 с максимальным значением потенциала $p_i^{(2)}$. Аналогично находятся центры всех следующих кластеров. Итерационная процедура пересчета потенциалов и выделения центров кластеров продолжается до тех пор, пока максимальное значение потенциала превышает некоторый заданный порог. Признаком наличия кластеров служит большой разброс значений потенциалов. Принадлежность точки к тому или иному кластеру определяется по расстоянию до центра этого кластера.

Модификацией алгоритма горной кластеризации является алгоритм субтрактивной кластеризации. После нахождения центра первого кластера из множества объектов исключаются те, которые ему принадлежат. После этого процедура итеративно повторяется до тех пор, пока максимальное значение потенциала превышает заданный порог.

Результаты

Исследование проводилось на реальных данных о движении судов, предоставляемых сервисами Автоматической идентификационной системы, собранных с ресурса [22] с помощью специально разработанной программной системы [5]. Задача успешно решалась для целого ряда акваторий. В статье приведён пример для Токийского залива. Были взяты данные о движении в течение двух дней, всего около 2 млн записей.

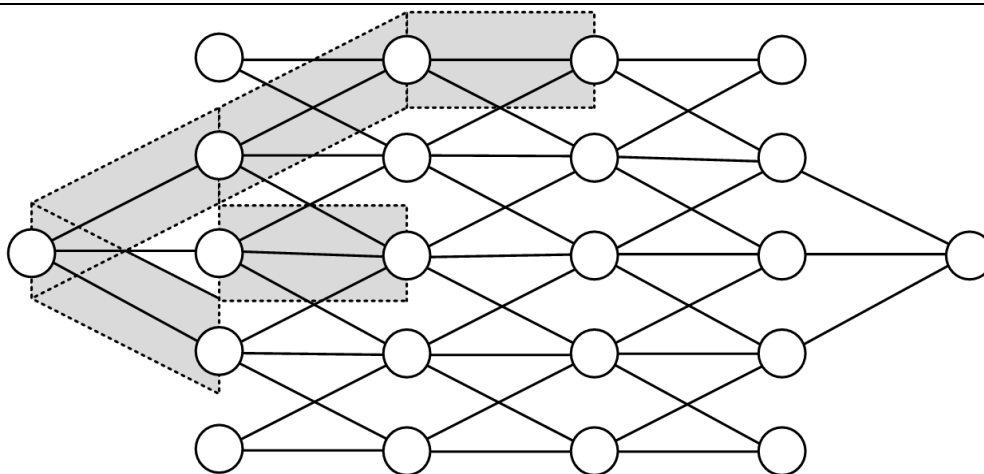


Рис. 1. Граф возможных маршрутов судна. Вес рёбер определяется на основе данных о движении в окрестности ребра (выделенные серым области)

Граф возможных маршрутов судна формировался на основе слоистого разбиения акватории регулярной сеткой вершин. Параметры разбиения подбирались таким образом, чтобы длина рёбер графа не превышала 4 км. Вес рёбер задавался с учётом характерных значений курса на отрезке $[0, 360^\circ)$, определённых путём кластеризации данных о движении в окрестности каждого ребра (рис. 1). Если движение по ребру не соответствовало характерному для участка акватории курсу, его вес принимался равным длине дуги большого круга. В противном случае он умножался на весовой коэффициент $a = 0.1$.

Использовался стандартный метод субтрактивной кластеризации. Значения параметров метода подбирались таким образом, чтобы корректно идентифицировать кластеры эталонной выборки данных. Были приняты следующие параметры субтрактивной кластеризации: параметр α соответствует радиусу кластера 16° ; объекты принадлежат кластеру, если лежат ближе, чем в 20° от его центра (1.25α). Итерационная процедура поиска центров кластеров продолжается, пока потенциал очередного кластера превышает 10% потенциала первого кластера (оставшиеся кластеры считаются незначимыми).

На рисунке 2 отражены результаты кластеризации курсов движения. Отрезками показаны курсы, соответствующие найденным кластерам: первому и второму (чёрные линии), третьему и четвёртому (серые линии). Хорошо видно, что найденные значения курсов полностью соответствуют направлению движения реальных судопотоков.

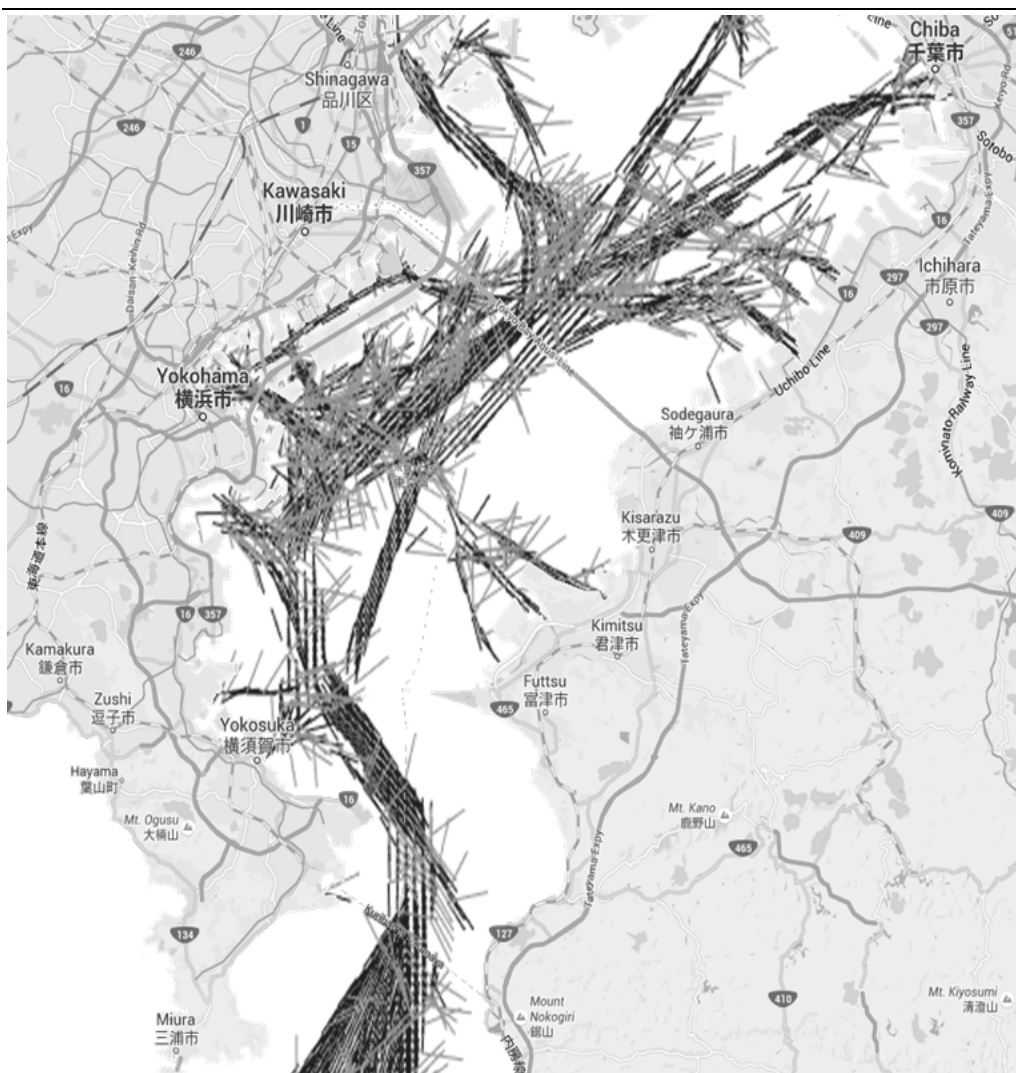


Рис. 2. Центры первого, второго (чёрные) и третьего, четвертого (серые) кластеров в данных о курсах судов

На рисунке 3 показаны результаты планирования маршрутов Тихий океан – Йокогама и обратно. На рисунке 4 показаны результаты планирования маршрутов Тихий океан – Чiba и обратно. Видно, что найденные маршруты полностью соответствуют направлению движения реальных судопотоков, принимают «правильную» сторону движения (показано стрелками, в судовождении принято правостороннее движение).



Рис. 3. Результаты планирования маршрута судна в Токийском заливе (Йокогама)

Развитие сервисов Автоматической идентификационной системы, технологий е-навигации, методов и инструментов сбора, хранения и обработки больших массивов данных дало возможность постановки и исследования новых задач в области судовождения. Так, наметилась эволюция традиционных моделей типа «судно-берег» и «судно-судно» в сторону описания коллективного движения судов на акватории в целом. Можно отметить работу [20], в которой на основе классической модели корабельного домена оценивается количество опасных сближений судов различных классов на тех или иных участках акватории, выделяются наиболее сложные для движения участки. Этой же задаче посвящены исследования [8; 9; 10]. В работе [21] предложен подход для оценки интенсивности движения на акваториях как функции плотности судов. В исследовании [27] предлагается метод оценки насыщенности трафика, учитывающий геометрические размеры судов. Отмечается, что некоторые акватории обладают ограниченной пропускной способностью для судов больших размеров. Приводится пример, где для безопасного прохождения крупных судов требуется уменьшить

их количество. В статье [26] предлагается подход к выбору скорости движения судна на основе ретроспективных данных о трафике конкретной акватории (проанализировано движение судов близ Шанхая). Скорость выбирается в зависимости от плотности трафика. Таким образом неявно учитывается коллективный опыт судоводителей.

Подходы, связанные с кластерным анализом данных о движении судов на акватории, также получают все большее развитие. Они исследуют варианты объектов кластеризации, их признаков, метрик и методов. Так, в работе [23] рассматривается задача оценки типичных маршрутов судов на акватории по данным АИС. Метод основан на разбиении акватории на небольшие участки, оценке в них плотности движения, предпочтительных переходов судов между ними, т.е. кластеризация происходит неявно. В результате формируются ломаные – маршруты судов между заданными начальной и конечной точками, учитывающие предыдущий трафик, в т.ч. принятую схему движения судов. Особенностью (и, по-видимому, существенным недостатком) метода является необходимость последующего сглаживания полученных маршрутов.



Рис. 4. Результаты планирования маршрута судна в Токийском заливе (Чиба)

В работе [29] кластеризация также используется для оценки типичных для акватории маршрутов. Объектами кластеризации являются ломаные, формируемые по ретроспективным данным АИС. Вводится метрика расстояния между ломаными. Алгоритм кластеризации основан на поиске областей связности, предлагается метод подбора параметров алгоритма. В результате выделяются основные маршруты судов в районе интенсивного судоходства (в работе приведён пример для одного из районов Южно-Китайского моря). Это позволяет выделять аномально движущиеся суда, чей маршрут не характерен для данной акватории. Метод не решает задачу планирования маршрутов. В статье [30] рассматривается похожая задача, объектами кластеризации являются данные о координатах, скоростях и курсах судов. В работе [24] также рассмотрена задача идентификации аномально движущихся судов, признаками являются их координаты, курсы и скорости. Акватория разбивается прямоугольной сеткой, маршруты судов представляются правилами перехода между клетками сетки. Кластеризация основана на построении гистограмм курсов и скоростей для каждой клетки по данным АИС. Аномальные значения скоростей и курсов идентифицируются по этим гистограммам. Хотя предложенный в работе подход может быть положен в основу задачи планирования маршрута судна, она явно не рассматривается. К недостаткам метода относят необходимость предобработки данных АИС для построения графа маршрутов, высокую вычислительную сложность соответствующих алгоритмов и необходимость большой выборки данных для построения гистограмм.

Настоящая работа посвящена приложению кластерного анализа данных о движении судов на акватории для решения классической задачи судовождения – планирования маршрута перехода судна. Такой подход обеспечивает новое качество маршрута – его соответствие устоявшимся параметрам движения, выработанным коллективным профессиональным опытом. Постулируя, что ретроспективные данные о движении на акватории являются результатом позитивной эксплуатационной практики, можно предполагать, что спланированный на их основе маршрут будет самым безопасным из возможных в конкретных навигационных условиях.

Упомянутый метод [24], основанный на определении правил движения методами статистики, наиболее близок к подходу, предложенному в настоящей работе, где предлагается использовать методы кластеризации. Это позволяет достоверно идентифицировать параметры движения и не требует больших массивов исходных данных. Так, в представленных на рис. 2–4 примерах характерное количество данных о курсах судов на «популярных» участках акватории было равно 20–50, на самых насыщенных, как правило, не превышало 200. Это вполне позволило построить устойчивую картину характерных параметров движения.

Вариант графа возможных маршрутов со слоистым разбиением акватории (рис. 1) следует признать удачным. На его основе формируются маршруты, не допускающие чрезмерных изменений курса. Характерное число вер-

шин и рёбер графа невелико даже для протяжённых маршрутов, что позволяет ограничиться детерминированными методами поиска кратчайшего пути.

Заключение

В работе рассматривается задача планирования маршрута перехода судна через акватории с интенсивным движением. Предлагается подход с использованием идеи, лежащей в основе технологии больших данных: движение судна должно соответствовать характерным кинематическим параметрам движения, определяемым по ретроспективной информации о трафике. Это позволяет учесть коллективный опыт судовождения на конкретной акватории.

Модельные представления задачи включают в себя граф возможных маршрутов судна и функцию «желательности» параметров движения. В работе рассмотрены несколько возможных вариантов модели. Обосновывается выбор в пользу слоистого разбиения акватории регулярной сеткой вершин. Вес рёбер графа определяется по результатам кластеризации ретроспективных данных о движении. Способ построения графа возможных маршрутов судна позволяет уменьшить размерность данных при кластеризации: акватория разбивается на небольшие участки, кластеризация данных о движении осуществляется для каждого из участков отдельно. Признаками объектов являются курсы и скорости движения (совместно или по отдельности). Указывается, что предпочтительнее использовать методы кластеризации, не требующие предварительного задания количества кластеров, например, горной и субтрактивной кластеризации.

Источником данных о трафике акватории могут служить сервисы Автоматической идентификационной системы. В работе показана возможность использования данных АИС, доступных на специализированных интернет-ресурсах. Несмотря на «разреженность» этих выборок данных, они достаточно адекватно представляют сводные особенности трафика. Для построения рис. 2–4 были обработаны массивы из 2 млн записей таких данных о движении. В целом их оказалось достаточно для решения задачи.

Приведенные примеры планирования маршрута перехода через Токийский залив свидетельствуют о том, что найденные маршруты достаточно хорошо соответствуют характерному движению судов по акватории, что подтверждает перспективность предложенного подхода для практики.

1. Планирование маршрута перехода судна с учётом опасности морского волнения / Д.А. Акмайкин, О.А. Букин, В.М. Гриняк, М.А. Москаленко // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4-5(42). – С. 148–152.
2. Акмайкин Д.А., Хоменко Д.Б., Клюева С.Ф. Обзор функциональных возможностей и перспективы современных автоматизированных систем планирования маршрута судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.

3. Веремей Е.И., Сотникова М.В. Алгоритмы оптимизации маршрутов движения с учетом погодных условий // *International Journal Of Open Information Technologies*. – 2016. – Т. 4, № 3. – С. 55–61.
4. Гагарский Э.А., Козлов С.Г., Кириченко С.А. Безопасность судоходства при проектировании морского порта // *Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник*. – 2018. – № 1. – С. 14–18.
5. Головченко Б.С., Гриняк В.М. Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2014. – №2. – С. 156–162.
6. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Акмайкин Д.А. Планирование маршрутов судов с учетом опасности морского волнения // *Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник*. – 2018. – № 12. – С. 10–16.
7. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Иваненко Ю.С. Поддержка принятия решений при обеспечении безопасности движения судов на основе кластеризации траекторий // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2020. – № 3. – С. 436-449. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-436-449
8. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Люлько В.И. Оценка опасности трафика морской акватории по данным автоматической идентификационной системы // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2017. – Т. 9, № 4. – С. 681-690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690
9. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Шуленина А.В. Оценка эмоциональной нагрузки на судоводителей в условиях коллективного движения // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2019. – Т. 11, № 4. – С. 640–651. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-640-651
10. Цифровое представление и комплексная оценка навигационной безопасности движения на морских акваториях / В.М. Гриняк, Ю.С. Иваненко, В.И. Люлько [и др.] // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 40–41. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.003
11. Каретников В.В., Козик С.В., Буцанец А.А. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2019. – Т. 11, № 6. – С. 987-1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002
12. Общие положения об установлении путей движения судов № 9036 / ГУНиО МО СССР, 1987. – 32 с.
13. Першина Л.А., Астреина Л.Б. Выбор маршрута судна на основе погодных условий // *Эксплуатация морского транспорта*. – 2019. – № 2. – С. 30–38. DOI: 10.34046/aumsuomt91/6
14. Сотникова М.В. Алгоритмы формирования маршрутов движения судов с учетом прогноза погодных условий // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. – 2009. – № 2. – С. 181–196.
15. Таратынов В.В. Целесообразность разделения морских путей // *Морской флот*. – 1969. – № 9. – С. 19–20.
16. Системы управления безэкипажными судами / А.В. Титов, Л. Баракат, В.А. Чанчиков [и др.] // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2019. – № 1-4(43). – С. 109–120.

17. Akmaykin D.A., Grinyak V.M. Ships route searching with respect of sea waves danger // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 272. – P. 032103. DOI: 10.1088/1755-1315/272/3/032103
18. Bezdek J.C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. – Boston: Springer, 1981. – P. 256.
19. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. – New York: Springer Science Business Media, 2006. – 738 p.
20. Debnath A., Chin H.Ch. Modelling collision potentials in port anchorages: application of the navigational traffic conflict technique (NTCT) // Journal of Navigation. – 2016. – Vol. 69, Is. 1. – P. 183–196. DOI: 10.1017/S0373463315000521
21. Liu Z., Wu Zh., Zheng Zh. Modelling ship density using a molecular dynamics approach // Journal of Navigation. – 2020. – Vol. 73, Is. 3. – P. 628–645. DOI: 10.1017/S0373463319000857
22. Marine Traffic. – URL: <http://www.marinetraffic.com> (дата обращения: 1.04.2020).
23. Naus K. Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data // Journal of Navigation. – 2019. – Vol. 73, Is. 3. – P. 726–745. DOI: 10.1017/S0373463319000948
24. Detection of abnormal vessel behaviour based on probabilistic directed graph model / H. Tang, L. Wei, Y. Yin [et al.] // Journal of Navigation. – 2019. – Vol. 73, Is. 5. – P. 1014–1035. DOI: 10.1017/S0373463320000144
25. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing / H.B. Wang, X.B. Li, P.F. Li [et al.] // Journal of Navigation. – 2018. – № 4. – P. 989–1010. DOI: 10.1017/S0373463318000048
26. Use of AIS data for performance evaluation of ship traffic with speed control / L. Wang, Y. Li, Zh. Wan [et al.] // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 204. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107259
27. Weng J., Liao Sh., Yang D. Methodology for estimating waterway traffic capacity at shanghai estuary of the Yangtze river // Journal of Navigation. – 2020. – Vol. 73, Is. 1. – P. 75–91. DOI: 10.1017/S0373463319000493
28. Yager R., Filev D. Essentials of fuzzy modeling and control. – New York: John Wiley & Sons, 1994. – 408 p.
29. Zhao L., Shi G. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network // Journal of Navigation. – 2019. – Vol. 72, Is. 4. – P. 894–916. DOI: 10.1017/S0373463319000031
30. Maritime anomaly detection within coastal waters based on vessel trajectory clustering and naïve Bayes classifier / R. Zhen, Y. Jin, Q. Hu [et al.] // Journal of Navigation. – 2017. – Vol. 70, Is. 3 – P. 648–670. DOI: 10.1017/S0373463316000850

Транслитерация

1. Planirovanie marshruta perekhoda sudna s uchyotom opasnosti morskogo volneniya / D.A. Akmajkin, O.A. Bukin, V.M. Grinyak, M.A. Moskalenko // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2018. – № 4-5(42). – S. 148–152.
2. Akmajkin D.A., Homenko D.B., Klyueva S.F. Obzor funkcional'nyh vozmozhnostej i perspektivy sovremennyh avtomatizirovannyh sistem planirovaniya marshruta sudna // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – 2017. – Т. 9, № 2. – S. 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251

3. Veremej E.I., Sotnikova M.V. Algoritmy optimizacii marshrutov dvizheniya s uchetom pogodnyh uslovij // International Journal Of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4, № 3. – С. 55–61.
4. Gagarskij E.A., Kozlov S.G., Kirichenko S.A. Bezopasnost' sudohodstva pri proektirovani morskogo porta // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchnyj informacionnyj sbornik. – 2018. – № 1. – С. 14–18.
5. Golovchenko B.S., Grinyak V.M. Informacionnaya sistema sbora dannyh o dvizhenii sudov na morskoy akvatorii // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – 2014. – № 2. – С. 156–162.
6. Grinyak V.M., Devyatisil'nyj A.S., Akmajkin D.A. Planirovanie marshrutov sudov s uchetom opasnosti morskogo volneniya // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchnyj informacionnyj sbornik. – 2018. – №12. – С. 10–16.
7. Grinyak V.M., Devyatisil'nyj A.S., Ivanenko Yu.S. Podderzhka prinyatiya reshenij pri obespechenii bezopasnosti dvizheniya sudov na osnove klasterizacii traektorij // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – 2020. – № 3. – С. 436–449. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-436-449.
8. Grinyak V.M., Devyatisil'nyj A.S., Lyul'ko V.I. Ocenka opasnosti trafika morskoy akvatorii po dannyh avtomaticheskoy identifikacionnoj sistemy // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – 2017. – Т. 9, № 4. – С. 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.
9. Grinyak V.M., Devyatisil'nyj A.S., Shulenina A.V. Ocenka emocional'noj nagruzki na sudovoditelej v usloviyah kollektivnogo dvizheniya // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – 2019. – Т. 11, № 4. – С. 640–651. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-640-651.
10. Cifrovoe predstavlenie i kompleksnaya ocenka navigacionnoj bezopasnosti dvizheniya na morskikh akvatoriayah / V.M. Grinyak, Yu.S. Ivanenko, V.I. Lyul'ko [i dr.] // Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 40–41. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.003.
11. Karetnikov V.V., Kozik S.V., Bucanec A.A. K voprosu ocenki riskov ispol'zovaniya bezekipaznyh sredstv vodnogo transporta na uchastke akvatorii // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – 2019. – Т. 11, № 6. – С. 987-1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.
12. Obshchie polozheniya ob ustanovlenii putej dvizheniya sudov № 9036 / GUNiO MO SSSR, 1987. – 32 s.
13. Pershina L.A., Astreina L.B. Vybor marshruta sudna na osnove pogodnyh uslovij // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2019. – № 2. – С. 30–38. DOI: 10.34046/aumsuomt91/6.
14. Sotnikova M.V. Algoritmy formirovaniya marshrutov dvizheniya sudov s uchetom prognoza pogodnyh uslovij // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 10: Prikladnaya matematika. Informatika. Processy upravleniya. – 2009. – № 2. – С. 181–196.
15. Taratynov V.V. Celesoobraznost' razdeleniya morskikh putej // Morskoy flot. – 1969. – № 9. – С. 19–20.
16. Sistemy upravleniya bezekipaznymi sudami / A.V. Titov, L. Barakat, V.A. Chanchikov [i dr.] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2019. – № 1-4(43). – С. 109–120.

Для цитирования: Гриняк В. М. Планирование маршрутов судов на основе кластеризации ретроспективных данных трафика акватории // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 61–78.

For citation: Grinyak V. M. Vessel route planning based on traffic historical data clustering, *The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2021, Vol. 13, № 2, pp. 61–78.

DOI <https://doi.org/10.24866/VVSU/2073-3984/2021-2/061-078>

Дата поступления: 21.05.2021.