

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТРАЕКТОРНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ СУДОВ ЧЕРЕЗ АКВАТОРИИ С ИНТЕНСИВНЫМ ТРАФИКОМ¹

Доктор техн. наук **Гриняк В.М.**

(Владивостокский государственный университет экономики и сервиса),

Иваненко Ю.С.

(Дальневосточный федеральный университет),

Шуленина А.В.

(Дальневосточный федеральный университет)

CLUSTER ANALYSIS OF TRAJECTORY DATA FOR PLANNING SHIP ROUTES THROUGH WATER AREAS WITH HEAVY TRAFFIC

V.M. Grinyak, Ph.D. (Tech.),

(Vladivostok State University of Economics and Service)

Y.S. Ivanenko,

(Far Eastern Federal University)

A.V. Shulenina,

(Far Eastern Federal University)

Управление движением судов; система установления путей движения; планирование маршрута перехода; интенсивное движение; кластеризация; курс; скорость; большие данные; алгоритмы на графах; автоматическая идентификационная система.

Marine traffic control; route planning; traffic intensity; clustering; course; speed; big data; graph algorithms; automatic identification system.

Работа посвящена проблеме обеспечения навигационной безопасности движения на морских акваториях. Рассматривается задача планирования маршрута перехода с учетом информации о характерных параметрах движения (траекториях) судов на выбранной морской акватории. Разработан способ решения задачи, основанный на поиске кратчайшего пути на взвешенном графе. Вес рёбер графа задаётся по результатам кластеризации ретроспективных данных о движении. Это даёт возможность задавать маршруты судов согласно схеме движения в акватории. Представлены результаты расчётов на реальных данных о движении судов в Сангарском проливе.

This paper is about navigation safety of marine traffic at sea areas. The problem of ship route planning for pathing through the sea area with high intensive traffic is considered in this paper. One of the ways to identify navigation limitations could be trajectory pattern recognition at certain sea areas based on retrospective traffic analysis. Model representation for such task could be based on vessel moving parameters clustering. The presented model is based on solving the shortest path problem on weighted graph. Possible ways of clustering are discussed and the choice made in favor of subtractive clustering. The historical AIS data of sea traffic at Tsugaru strait is used for identifying traffic schema and ship routes planning with the model designed under presented research.

Введение

Обеспечение безопасности движения судов в условиях интенсивного трафика представляет собой актуальную комплексную научную и прикладную проблему. В рамках проблемы выделена задача планирования маршрута перехода, целью которой является плавание по самому короткому из возможных путей, за самое короткое время, с наименьшим расходом топлива и т.п.

Особенности морского трафика по предполагаемому маршруту судна оказывают существенное влияние на выбор маршрута из множества возможных. Так, для акваторий с интенсивным движением часто вводится система установления путей движения судов, представляющая собой совокупность ограничений, обусловленных схемой движения судов («правилами движения»), определённой для конкретной акватории. 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 морской акватории из ретроспективной информации о её трафике на основе идеи о кластеризации параметров движения судов.

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 [1]). Вес рёбер графа определяется «желательностью» того или иного курса судна для каждой точки акватории с учётом выявленных паттернов движения. В результате выбирается маршрут судна, являющийся наиболее «типичным» (а значит и безопасным) для выбранной акватории.

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

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90018.

Основные модельные представления

Введём систему координат x, y , где ось x – географическая долгота, а ось y – географическая широта судна. Определим функцию желательности параметров движения судна $u(x, y, k, v)$, где k – курс, v – скорость, x, y – координаты судна. Желательность движения судна по выбранному маршруту q (некоторая кривая) может быть выражена как криволинейный интеграл первого рода

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

Решение оптимизационной задачи выбора маршрута q обеспечивает минимум функционала U :

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

Хотя непосредственное решение последней задачи в принципе возможно, на практике к нему прибегают редко 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 [2]. 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 центров квадратов 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 те рёбра, которые проходят 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 порождать неудобные или вообще нереализуемые маршруты.

Регулярная сетка вершин. Слоистое разбиение акватории.

Примем, что возможные маршруты судна лежат внутри прямоугольника. Прямоугольник строится так, что начало маршрута лежит в середине одной стороны прямоугольника, а конец маршрута – в середине противоположной стороны; прямоугольник заполняется вершинами графа так, чтобы формировалась правильная прямоугольная сетка. Вершины графа, лежащие на отрезках, перпендикулярных отрезку с вершинами в начальной и конечной точках маршрута, назовём слоями вершин. Примем, что при движении судна возможны переходы только между ближайшими слоями вершин. Рёбра, проходящие по недопустимым для движения участкам, исключаются. 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 возможно 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 также, как при разбиении на квадратные участки, а может формироваться на основе данных о движении, если известны подмножества кортежей, относящихся к одной траектории. В последнем случае его следует дополнить и «не реализованными» вариантами рёбер для обеспечения связности графа. Достоинством такого подхода является формирование возможных маршрутов судов, характерных для конкретной акватории. Недостатком является 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 имеются 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 t

«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 также 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 может приводить 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 их реализующих судов. 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 том 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 акваторию с интенсивным движением. Оно хорошо зарекомендовало себя и в других задачах [2]. Вес ребер задаётся с учётом характерных значений курса и скорости, определённых путём кластеризации параметров движения.

Для кластеризации вводится метрика – функция, задающая степень близости между объектами [3]. В рассматриваемой задаче эту метрику расстояния D_{12} между объектами 1 и 2 можно ввести следующим образом:

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

Здесь w_{lon} , w_{lat} , w_{speed} , w_{course} – весовые коэффициенты, которые задаются исходя из данных о характерных размерах кластеров по каждому из измерений. Например, по курсу характерные размеры могут составлять 5-10 градусов, по скорости – 2-3 м/с. Функция разности курсов $k_1 - k_2$ учитывает периодичность 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 подходящими горная и субтрактивная кластеризация, которые не требуют задания количества кластеров [3]. Алгоритм горной кластеризации состоит в следующем. Пусть имеется множество из M объектов и имеется матрица расстояний D_{ij} , задающая степень близости между объектами с индексами i и j . Примем, что сами объекты являются возможными центрами кластеров. Для каждого объекта рассчитывается значение его потенциала:

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

где α – число, характеризующее масштаб расстояний D_{ij} , $\exp(\)$ – оператор экспоненты. На первом шаге алгоритма выбирают объект с индексом \max_1 , имеющий максимальный потенциал, который и будет центром первого кластера. На втором шаге пересчитывают значения потенциалов объектов по формуле:

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

где β – число, определяющее размер кластеров. Точка с индексом \max_2 с максимальным значением потенциала $p_i^{(2)}$ будет центром второго кластера. Точно также находят центры всех следующих кластеров, процедура продолжается, например, пока потенциал очередного кластера превышает некоторый заданный порог или пока имеет место разница между потенциалами соседних уровней.

Субтрактивная кластеризация похожа на горную кластеризацию: после нахождения центра первого кластера из множества объектов исключаются те, которые ему принадлежат. Процедура итерационно повторяется пока значение потенциала очередного кластера превышает заданный порог.

Результаты

Исследование проводилось для целого ряда акваторий с использованием реальных данных о движении судов, собранных с ресурса *marinetraffic.com* с помощью специально разработанной программной системы. Здесь приведён пример успешного решения задачи для Сангарского пролива. Для нахождения маршрута судов через пролив были взяты данные о его трафике в течение одной недели (всего около 1.5 млн записей типа «долгота, широта, скорость, курс»).

Граф возможных маршрутов судна формировался на основе слоистого разбиения акватории регулярной сеткой вершин. Параметры разбиения подбирались таким образом, чтобы длина рёбер графа не превышала 3 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 $\alpha = 0.1$.

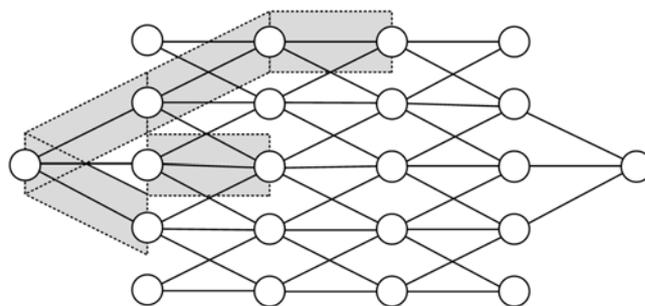


Рис. 1. Граф возможных маршрутов судна. Вес рёбер определяется на основе данных о движении в окрестности ребра (выделенные серым области)

Использовался стандартный метод субтрактивной кластеризации. 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); процедура поиска центров кластеров продолжается, пока потенциал очередного кластера превышает 10% потенциала первого кластера. Такие значения параметров метода корректно идентифицировали кластеры эталонной выборки данных.

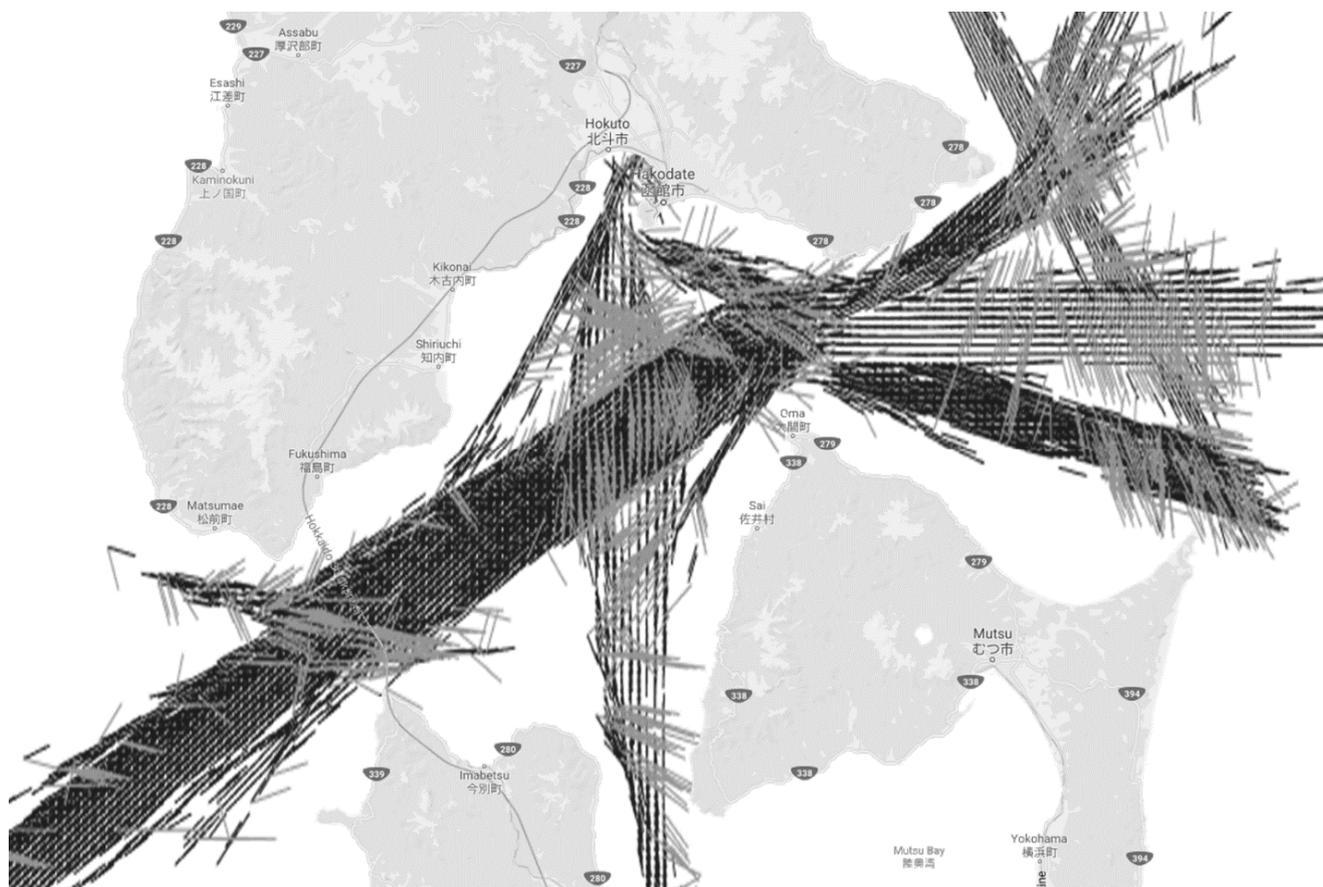


Рис. 2. Центры первого, второго (чёрные) и третьего, четвёртого (серые) кластеров в данных о курсах судов

На рис. 2 показаны результаты кластеризации курсов движения. Отрезками показаны курсы, соответствующие найденным кластерам: первому и второму (чёрные линии), третьему и четвёртому (серые линии). Видно, что найденные значения курсов хорошо соответствуют реальным судопотокам акватории.

На рис. 3 показаны результаты планирования маршрутов Тихий океан – Японское море (восток – запад)

и порт Хакодате – залив Муцу (север – юг) и обратно. На рис. 4 показаны результаты планирования маршрутов порт Хакодате – Японское море (север – запад) и порт Хакодате – Тихий океан (восток – север) и обратно. Видно, что найденные маршруты полностью соответствуют реальным судопотокам акватории, принимают «правильную» сторону движения (в судовождении принято правостороннее движение).

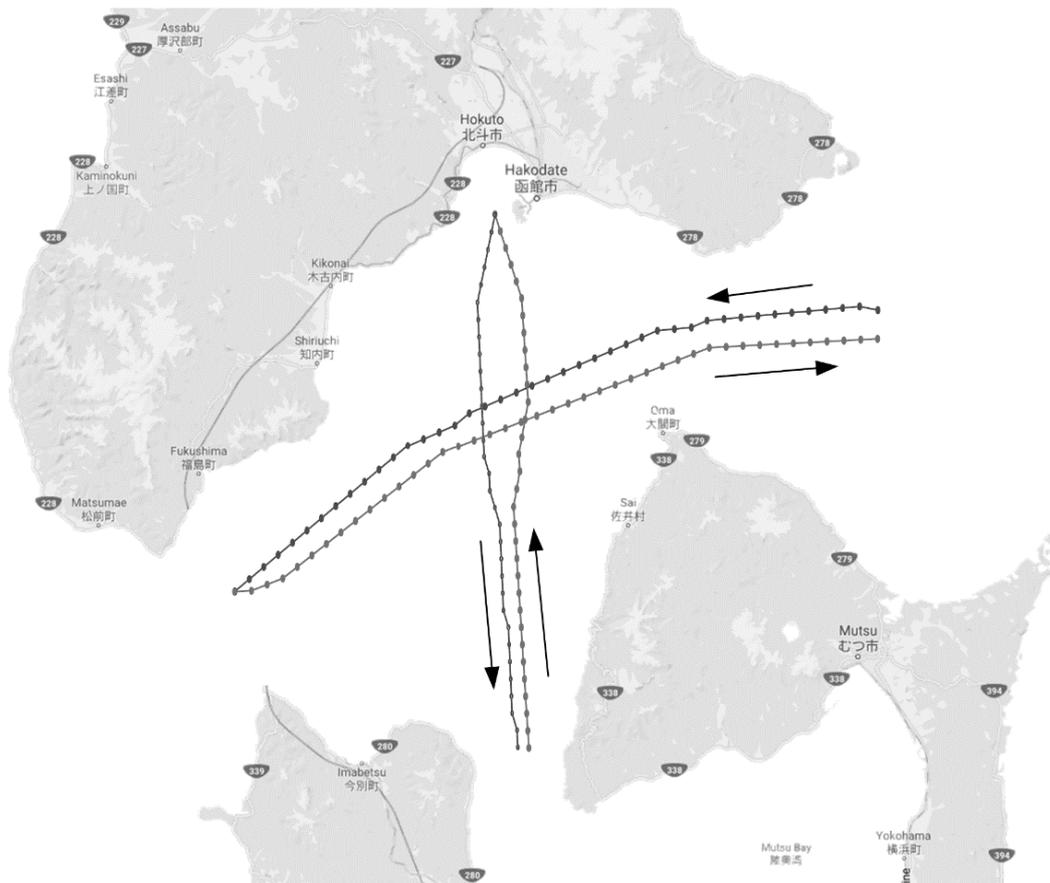


Рис. 3. Результаты планирования маршрута судна в Сангарском проливе

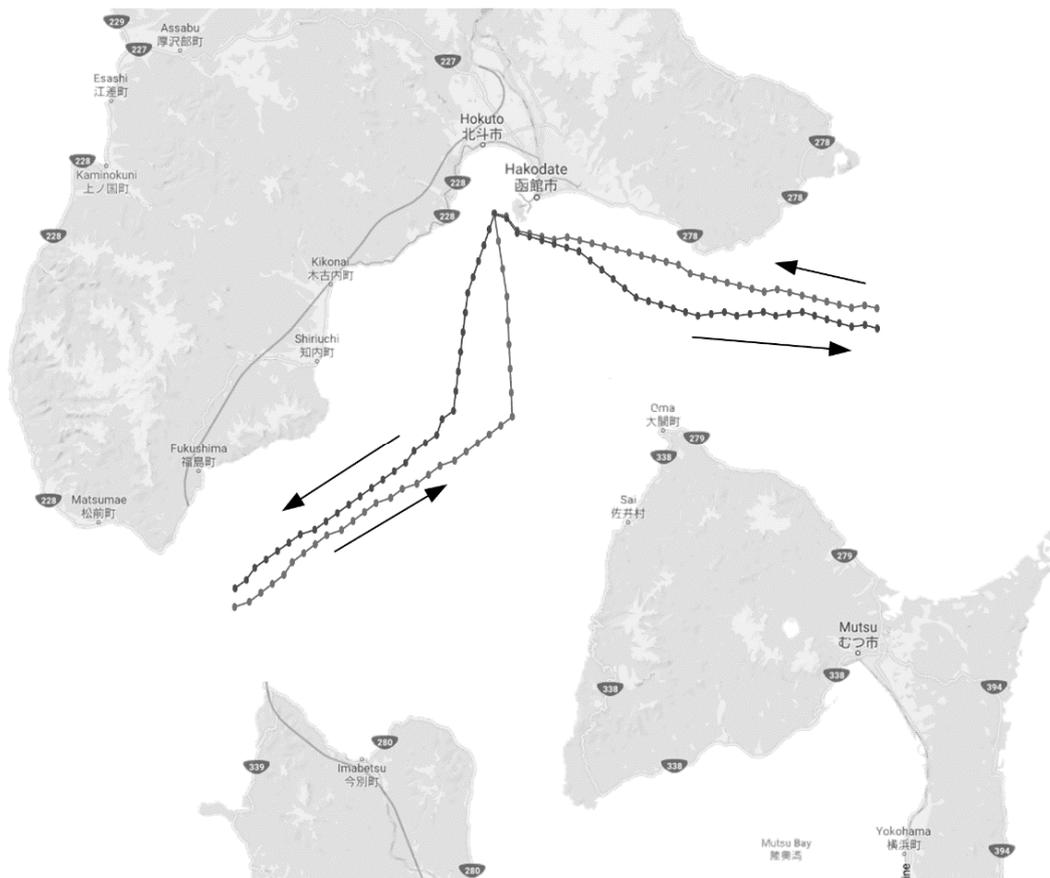


Рис. 4. Результаты планирования маршрута судна в Сангарском проливе

Обсуждение

Развитие сервисов Автоматической идентификационной системы (АИС), 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 [4], в которой предложен подход для оценки интенсивности движения на акваториях как функции плотности судов. В исследовании [5] 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 [6] предлагается подход к выбору скорости движения судна на основе ретроспективных данных о трафике конкретной акватории (в статье 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 кластеризации. Так, в работе [7] 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.

В работе [8] 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 [9] рассматривается похожая задача, объектами кластеризации являются данные о координатах, скоростях и курсах судов. Работа [10] также рассматривает задачу 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. Недостатком метода является необходимость предобработки данных АИС для построения графа маршрутов, высокая вычислительная сложность соответствующих алгоритмов и необходимость большой выборки данных для построения гистограмм.

Настоящая работа также 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, выработанных 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 [10], основанный на определении правил движения методами статистики, является наиболее близким 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 представленном на рис. 2-4 примере 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 вершин и рёбер графа невелико даже для протяжённых маршрутов, что позволяет ограничиться детерминированными методами поиска кратчайшего пути.

Заключение

1. В работе рассматривается задача планирования маршрута перехода судна через акватории с интенсивным движением. Предлагается подход, основанный на использовании 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.

2. Модельные представления задачи включают в себя граф возможных маршрутов судна и функцию «желательности» параметров движения. В работе рассмотрено 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.

3. 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). В работе приведён пример

только для курсов в силу особенностей использованной выборки данных: движение в Сангарском проливе характеризуется стабильностью скоростей судов. Указывается, что предпочтительнее использовать методы кластеризации, не требующие предварительного задания количества кластеров, например, горной и субтрактивной кластеризации.

4. В работе приведены примеры планирования маршрутов перехода через Сангарский пролив. Видно, что найденные маршруты достаточно хорошо соответствуют характерному движению судов по акватории, что подтверждает перспективность предложенного подхода для практики.

Литература

1. Веремей Е.И. Алгоритмы оптимизации маршрутов движения с учетом погодных условий / Е.И. Веремей, М.В. Сотникова // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2016. – Т. 4. – № 3. – С. 55-61.
2. Акмайкин Д.А. 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.
3. Yager R. *Essentials of fuzzy modeling and control* / R. Yager, D. Filev. – New York: John Wiley & Sons, 1994. – p. 408.
4. Liu Z. Modelling ship density using a molecular dynamics approach / Z. Liu, Zh. Wu, Zh. Zheng // *Journal of Navigation*. – 2020. – Vol. 73. – Is. 3. – P. 628-645.
5. Weng J. Methodology for estimating waterway traffic capacity at shanghai estuary of the Yangtze river / J. Weng, Sh. Liao, D. Yang // *Journal of Navigation*. – 2020. – Vol. 73. – Is. 1. – P. 75-91.
6. Wang L. Use of AIS data for performance evaluation of ship traffic with speed control / L. Wang, Y. Li, Zh. Wan, Z. Yang, T. Wang, K. Guan, L. Fu // *Ocean Engineering*. – 2020. – Vol. 204.
7. Naus K. Drafting route plan templates for ships on the basis of AIS historical data / K. Naus // *Journal of Navigation*. – 2019. – Vol. 73. – Is. 3. – P. 726-745.

8. Zhao L. Maritime anomaly detection using density-based clustering and recurrent neural network / L. Zhao, G. Shi // *Journal of Navigation*. – 2019. – Vol. 72. – Is. 4. – Pp. 894-916.

9. Zhen R. Maritime anomaly detection within coastal waters based on vessel trajectory clustering and naïve Bayes classifier / R. Zhen, Y. Jin, Q. Hu, Zh. Shao, N. Nikitakos // *Journal of Navigation*. – 2017. – Vol. 70. – Is. 3 – Pp. 648-670.

10. Tang H. Detection of abnormal vessel behaviour based on probabilistic directed graph model / H. Tang, L. Wei, Y. Yin, H. Shen, Y. Qi // *Journal of Navigation*. – 2019. – Vol. 73. – Is. 5. – Pp. 1014-1035.

Сведения об авторах:

Гриняк Виктор Михайлович.

Место работы: Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, профессор кафедры Информационных технологий и систем.

Адрес: 690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41.

Телефон 89046234235.

E-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru.

Иваненко Юрий Сергеевич.

Место работы: Дальневосточный федеральный университет, ассистент кафедры Прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения.

Адрес: 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.

Телефон 89510091043.

E-mail: yurown92@yahoo.com.

Шуленина Алёна Викторовна.

Место работы: Дальневосточный федеральный университет, старший преподаватель кафедры Прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения.

Адрес: 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.

Телефон +79242442668.

E-mail: shuleninaav@mail.ru.