

В. М. ГРИНЯК, Ю. С. ИВАНЕНКО, А. В. ШУЛЕНИНА  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток

## ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТОВ СУДОВ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ

*Статья посвящена проблеме обеспечения безопасности движения судов на морских акваториях. В условиях насыщенного трафика безопасность движения судов может быть обеспечена только при соблюдении ими определённой схемы движения. В работе ставится задача планирования маршрутов судов через акватории с интенсивным движением. В основу модели задачи положен поиск кратчайшего пути на взвешенном графе. Вес рёбер предлагается задавать с учётом кластеризации курсов. Это позволяет реализовать идею планирования маршрута с учётом информации о характере движения на том или ином участке акватории. Работа сопровождается результатами расчётов на реальных данных о движении судов в Сангарском проливе.*

**Введение.** Классические представления о безопасном движении судов включают в себя три задачи, решаемые судоводителями и операторами береговых служб: оценку риска опасного сближения, предупреждение опасного сближения и планирование траектории безопасного движения [1]. Одним из элементов организации движения в районах интенсивного судоходства является система установления путей движения судов [2], [3], представляющая собой набор ограничений, накладываемых определённой схемой движения судов («правилами движения»), принятой на конкретной акватории. Суда, 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.

При плавании на большие расстояния три классические задачи дополняются планированием маршрута перехода судна, цель которого – оптимизация движения, например, плавание по кратчайшему из возможных путей, за кратчайшее время, с минимальным расходом топлива и т. п. [4], [5]. При движении через акватории с установленными путями планирование маршрута перехода судна следует осуществлять с учётом заданных ограничений. Перспективным путём идентификации этих ограничений является выделение устоявшихся, выработанных эксплуатационной практикой 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 настоящей работе рассматривается задача планирования маршрута перехода судна через акватории с интенсивным движением; задача представляется актуальной в свете перспективного развития беспилотных морских транспортных средств. Предлагается ввести функцию «желательности» того или иного курса судна для каждой точки акватории с учётом выявленных паттернов движения. С учётом этой информации строится взвешенный граф возможных маршрутов судна. Планирование маршрута судна сводится, таким образом, к поиску кратчайшего пути на графе. Предлагаемый доклад посвящён оценке возможности решения замкнутой задачи идентификации паттернов движения и планирования маршрутов судов таким способом.

**Модельные представления задачи.** Планирование маршрута судна через акваторию с интенсивным движением включает в себя следующие этапы:

1. Разбиение участка водной поверхности вершинами графа.
2. Определение множества рёбер графа.
3. Оценка веса рёбер графа.
4. Поиск кратчайшего пути на графе.

**Разбиение вершинами графа.** Рассмотрим систему координат  $xu$ , где ось абсцисс  $x$  соответствует географической долготе, а ось ординат  $y$  – географической широте судна. Введём множество из  $N$  точек  $p_i$  с координатами  $x_i, y_i$ . При этом 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 на плоскости  $xu$  внутри квадрата со стороной, равной длине отрезка с вершинами в начальной и конечной точках маршрута ( $p_1$  и  $p_N$  соответствен-

но). При этом точка  $p_1$  лежит в середине стороны квадрата, а точка  $p_N$  – в середине противоположной стороны (то есть отрезок  $p_1p_N$  делит квадрат пополам). Заполним этот квадрат точками так, чтобы они образовывали правильную прямоугольную сетку. Пусть  $n$  – число точек, разбивающих при этом отрезок  $p_1p_N$ , а  $m$  – число рядов точек справа и слева от этого отрезка.

**Определение множества рёбер графа.** В рассматриваемой задаче предлагается прибегнуть к хорошо зарекомендовавшему себя подходу «послойного» формирования рёбер [6], [7], учитывающему судоводительскую специфику. Назовём вершины графа, лежащие на отрезках, перпендикулярных отрезку  $p_1p_N$  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. Рис. 1 иллюстрирует идею формирования графа: имеется  $n$  слоёв по  $m + 1$  вершин в каждом, а также вершины начала и конца. Целесообразно также ограничить максимальную длину ребра. Конкретные значения  $n$ ,  $m$  и максимальной длины ребра определяются исходя из специфики конкретной акватории.

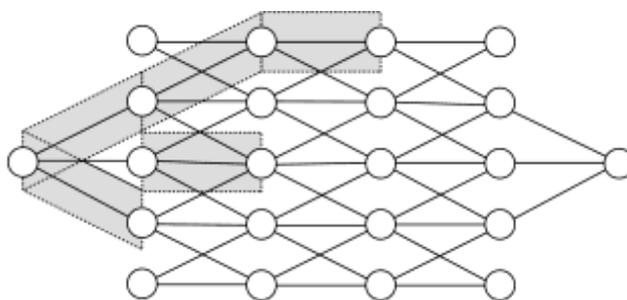


Рис. 1. Идея формирования графа возможных маршрутов судна

**Оценка веса рёбер графа.** Коллективное движение судов как правило характеризуется типичными (рекомендуемыми и/или реализуемыми) значениями курса и скорости на тех или иных участках акватории [8], [9]. Для описания схемы движения на акватории удобно использовать модельные представления кластеризации [10]: выделяются объекты с «самыми типичными» характеристиками, принимаемые за центры кластеров; остальные объекты относят к соответствующим подмножествам, если они «похожи» на выделенные центры. Для решения задачи кластеризации такого типа хорошо зарекомендовал себя алгоритм субтрактивной кластеризации, не требующий задания количества кластеров [11]. Центральным элементом кластеризации является определение метрики расстояния между объектами. Данные о движении судов представляют собой множество кортежей величин  $LON$ ,  $LAT$ ,  $SPEED$ ,  $COURSE$  – соответственно долгота, широта, скорость и курс. В описываемой задаче целесообразно прибегнуть к декомпозиции: разбить акваторию на участки и осуществлять кластеризацию для каждого из участков отдельно, считая, что признаками объектов являются только курсы. Такое представление вполне соотносится с практической отраслевой спецификой.

Пусть имеются данные о движении судов за некоторый период времени. Пусть в области, соответствующей тому или иному ребру графа рис. 1 (серый четырёхугольник вокруг ребра) имеется множество судов и имеется матрица расстояний  $D_{ij}$ , задающая степень близости между объектами с индексами  $i$  и  $j$ . Метрика расстояния между объектами с индексами  $i$  и  $j$  задается как  $D_{ij} = \sqrt{(COURSE_i - COURSE_j)^2}$  (разность курсов доопределяется с учётом периодичности значений угла). Путём субтрактивной кластеризации находят курсы судов, характерные для выбранной области (центры и размеры кластеров). Введём функцию «желательности» того или иного курса судна следующим образом. Если курс, соответствующий направлению движения по ребру графа, соответствует найденным кластерам, то такое движение считается «желательным» (функция «желательности» принимается равной 1), в противном случае движение «нежелательно» (функция «желательности» равна 0.01). Вес ребра считается

равным его длине, делённой на функцию желательности. В том случае, если одна из вершин либо часть инцидентного им ребра попадает на запрещённый участок (например, на сушу), вес ребра принимается равным бесконечности. Если в рассматриваемой области кластеризация объектов невозможна (например, слишком мало данных), она считается областью с нерегулируемым движением и функция желательности принимается равной 0.1. Таким образом, рёбра, соответствующие паттернам движения на акватории, получают наименьший вес.

**Поиск кратчайшего пути на графе.** Поиск кратчайшего пути от вершины  $p_1$  до вершины  $p_N$  может быть проведён любым известным алгоритмом общего назначения (Дейкстры, Беллмана–Форда и др.). Выбор значений  $m$  и  $n$  во многом зависит от географических особенностей района и масштаба неоднородностей данных о движении судов. При этом следует иметь в виду, что сложность наиболее эффективных алгоритмов поиска пути на графах пропорциональна числу рёбер и числу вершин (или их логарифму) [12] и нужно ограничивать значения  $m$  и  $n$  так, чтобы время решения задачи оставалось приемлемым для практики.



Рис. 2. Результаты планирования маршрута судна в Сангарском проливе

**Результаты исследований.** Исследование проводилось на реальных данных о движении судов, собранных с ресурса [13] с помощью специально разработанной программной системы [14]. Приведён пример решения задачи для Сангарского пролива. Были взяты данные о движении в течение одной недели, всего около 1.5 млн записей. Использовался стандартный метод субтрактивной кластеризации. Значения параметров метода подбирались таким образом, чтобы корректно идентифицировать кластеры эталонной выборки. В результате характерный радиус кластера курсов судов был определён равным  $16^\circ$ ; курсы считались принадлежащими кластеру, если они лежали ближе, чем в  $20^\circ$  от его центра ( $1.25 \cdot 16^\circ$ ). Итерационная процедура поиска центров кластеров заканчивалась, если потенциал очередного кластера не превышал 10% потенциала первого кластера – оставшиеся кластеры считались не значимыми.

На рис. 2 линиями показаны результаты планирования маршрутов: Тихий океан – Японское море (восток – запад) и порт Хакодате – залив Муцу (север – юг, красные линии) и обратно (зелёные линии). Видно, что найденные маршруты полностью соответствуют направлению движения реальных судопотоков, в частности принимают «правильную» сторону движения (в судовождении принято правостороннее движение).

**Заключение.** С развитием технологий и сервисов Автоматической идентификационной системы, концепции е-навигации [15] и технологий облачных вычислений у исследователей

появилась возможность работать с большими массивами данных о реальном движении судов. Это обусловило обращение к моделям безопасности коллективного движения групп судов и на акватории в целом с выделением задач распознавания, классификации, кластеризации и прогнозирования, т.е. задач «больших данных». В настоящей работе предлагается метод решения задачи планирования маршрутов судов при их движении через акватории с насыщенным судопотоком, основанный на кластеризации курсов. Задача решается следующим образом:

1. Формирование базы ретроспективных данных о движении судов на выбранном участке акватории.
  2. Формирование графа возможных маршрутов судна.
  3. Оценка характерных значений курсов судов на определённых участках акватории.
  4. Оценка веса рёбер графа возможных маршрутов судна, поиск кратчайшего пути на графе.
- Исследования, проведённые на данных трафика реальных акваторий, подтвердили применимость предложенного метода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tam Ch. K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters. *Journal of Navigation*. 2009. Vol. 62. №3. P. 455–476.
2. **Лентарёв А.А.** Морские районы систем обеспечения безопасности мореплавания: учебное пособие. Владивосток: Морской государственный университет, 2004. 114 с.
3. **Лентарёв А.А.** Основы теории управления движением судов. Владивосток: Морской государственный университет, 2018. 181 с.
4. Wang H., Li X., Li P., Veremey E., Sotnikova M. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing. *Journal of Navigation*. 2018. Vol. 71. №4. P. 989-1010.
5. **Сотникова М.В.** Алгоритмы формирования маршрутов движения судов с учетом прогноза погодных условий. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2009. №2. С. 181-196.
6. **Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Акмайкин Д.А.** Планирование оптимального маршрута судна с учётом спутниковых метеоданных. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2018. №10. С. 4-10.
7. **Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Акмайкин Д.А.** Планирование маршрутов судов с учётом опасности морского волнения. *Транспорт: наука, техника, управление*. 2018. №12. С. 10-16.
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 имени адмирала С.О. Макарова*. 2017. №4. С. 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.
10. **Zhen R., Jin Y., Hu Q., Shao Zh., Nikitakos N.** Maritime anomaly detection within coastal waters based on vessel trajectory clustering and naïve Bayes classifier. *Journal of Navigation*. 2017. Vol. 70. №3. P. 648-670.
11. **Bishop C.M.** Pattern recognition and machine learning. New York: Springer Science Business Media, 2006. 738p.
12. **Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А.** Графы в программировании: визуализация и применение. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 1104 с.
13. MarineTraffic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.marinetraffic.com> (дата обращения: 01.08.2020).
14. **Головченко Б.С., Гриняк В.М.** Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2014. №2. С. 156–162.
15. **Титов А.В., Баракат Л., Хаизаран А.** Состояние и перспективы реализации технологии е-навигации. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2019. Т.11. №4. С. 621-630.

V.M. Grinyak, Yu.S. Ivanenko, A.V. Shuleniina (Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok)

#### **Ship Routes Planning Based on Traffic Clustering**

This work is about navigation safety of marine traffic at sea areas. In addition to traditional approach of danger situation detection based on vessels approaching, the current paper introduces another metrics derived from kinematic parameters of the vessel itself, to identify whether it follows patterns (rules) of the traffic at a certain sea area. Authors focused their efforts on analyzing existing traffic schemas in order to identify its danger level in general rather than scrutinizing on individual cases. Along with the traditional approach of sea traffic schema identifications, proposed original method of automated identification of sea traffic schemes based on clustering of movement parameters using historical AIS data. For the clustering decomposition Subtraction clustering algorithms were considered. 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.