

Построение оптимального логистического маршрута на морской акватории в условиях ледовой обстановки по данным беспилотных летательных аппаратов

Construction of an optimal logistics route in the sea under ice conditions based on data from unmanned aerial vehicles

Истомин / Istomin E.

Евгений Петрович

(biom@bk.ru)

доктор технических наук, профессор.

ЗАО «Институт телекоммуникаций»,

советник генерального директора.

г. Санкт-Петербург

Петров / Petrov Ya.

Ярослав Андреевич

(yaroslav.petrov025@gmail.com)

кандидат технических наук, доцент.

ЗАО «Институт телекоммуникаций»,

инженер ОК.

г. Санкт-Петербург

Мартын / Martyn I.

Ирма Андреевна

(irma_martyn@mail.ru)

кандидат технических наук.

ЗАО «Институт телекоммуникаций»,

инженер ОК.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Северный морской путь – Northern Sea Route; оптимизация маршрута – route optimization; морская навигация – maritime navigation.

Повышение нагрузки на транспортные пути Арктического региона и прогнозируемое увеличение навигационного сезона в Арктике являются актуальными на сегодня вопросами решения задач безопасности и оптимизации морских логистических маршрутов в условиях ледовой обстановки. Новые способы получения данных с использованием беспилотных летательных аппаратов получают все большее применение, что также ставит задачи в обработке данных и их анализа. В работе представлен алгоритм построения безопасного и оптимизированного навигационного маршрута в условиях ледовой обстановки на пути Северного морского пути. Алгоритм сочетает в себе методы машинного обучения и теорию графов. Результаты представляются в картографическом виде.

The increase in the load on the transport routes of the Arctic region and the projected increase in the navigation season in the Arctic are one of the urgent issues of solving safety problems and optimizing maritime logistics routes in an ice environment. New ways of obtaining data using unmanned aerial vehicles are becoming increasingly used, which also poses challenges in data processing and analysis. The paper presents an algorithm for constructing a safe and optimized navigation route in conditions of ice conditions along the Northern Sea Route. The algorithm combines machine learning methods and graph theory. The results are presented in cartographic form.

Введение

На сегодня перед Россией стоит задача перебросить всевозможные морские транспортные пути через Северный морской путь для независимости от иностранных государств при транспортировке морских грузов (рис. 1). Прогнозируемое освобождение Арктики ото льда и увеличение навигационного сезона не так безопасно с навигационной точки зрения, так как подобные ледовые условия гарантируют освобождения от больших ледяных массивов, увеличивая появление айсбергов, торосов, плавучих льдов и т. п. [1]. Таким образом, построение оптимальных маршрутов для безопасной навигации в подобных условиях становится актуальной проблемой, в которой могут помочь развивающиеся методы БПЛА [2] в совокупности с известными методами обработки и анализа данных (рис. 2).

Методология

На рис. 3–4 представлен алгоритм построения безопасного оптимального маршрута на морской акватории по данным БПЛА в зависимости от наличия ледовых образований [4, 5].

На первоначальном этапе с применением метода *k*-средних кластерного анализа производится деление растрового снимка на кластеры (рис. 4). Алгоритм

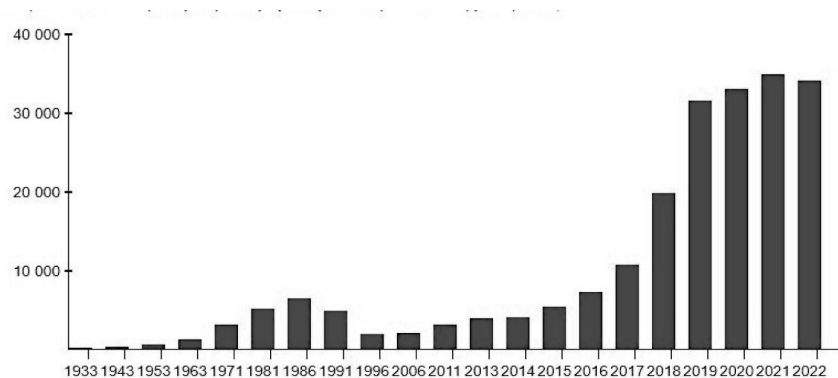


Рис. 1. Объем перевозок по Северному морскому пути с учетом транзитных грузов за период 1933–2022 гг. [3]

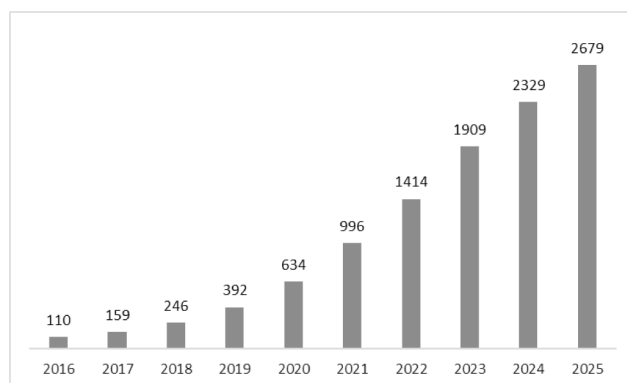


Рис. 2. Количество проданных дронов с прогнозом за период 2016–2025 гг. [4]



Рис. 3. Алгоритм построения оптимального маршрута в условиях ледовой обстановки по данным БПЛА

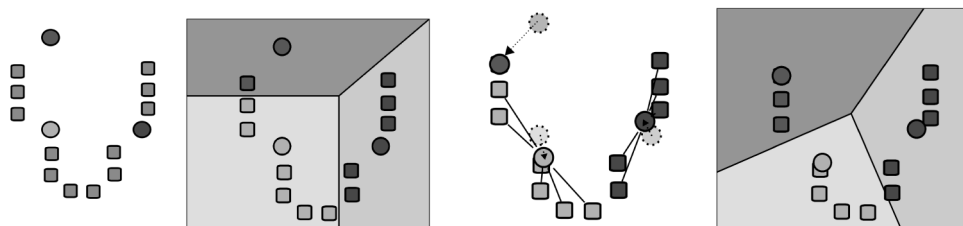


Рис. 4. Алгоритм работы метода k -средних кластерного анализа в двухмерном пространстве

работы метода k -средних основывается на минимизации суммы квадратов отклонений точек кластеров от центров этих кластеров:

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{x \in S} (x - \mu_i)^2, \quad (1)$$

где k – число кластеров, S – полученные кластеры (1, 2... k), μ_i – центры масс всех векторов x из кластера S [5].

Стоит отметить, что данный метод относится к методам «без обучения», что ставит начальные условия перед исследователем о заранее известном ему числе кластеров. Если исследователь не осведомлен заранее о точном количестве кластеров, на первоначальном этапе стоит провести выявление оптимального числа кластеров, например, при построении дендрограммы иерархического метода кластерного анализа с выбранной метрикой и расстоянием.

На следующем этапе производится построение оптимального маршрута с применением алгоритма Дейкстры только по заданному или заданным кластерам. Алгоритм Дейкстры – это метод нахождения кратчайших путей от одной вершины графа ко всем остальным, который считается одним из базовых для решения подобных задач. Для того, чтобы не увеличивать общую ошибку применения комбинации методов, авторами был выбран данный простой и надежный метод поиска кратчайшего пути. Вершинами графа в решаемой задаче являются пикселы изображения, ребра – расстояния между ними в условных единицах растрового изображения. Для работы алгоритма первоначально требуется установить начальную и конечную координаты путем задания условных координат (номер строки и столбца начальной точки) или ручным способом со снимка [6]. Далее алгоритм работает по стандартным шагам:

1. Установим $l(s)=0$ и считаем эту метку постоянной. Установим $l(x_i)=\infty$ для всех $x_i \neq s$ и считаем

эти метки временными. Установим $p=s$.

2. Обновление меток. Для всех вершин x_i с временными метками, смежных с вершиной p , изменить пометки в соответствии с правилом:

$$l(x_i) = \min\{l(x_i); l(p) + w(p, x_i)\}. \quad (2)$$

3. Если при этом метка $l(x_i)$ уменьшилась, присвоить метку $Q(x_i) = p$ (запоминаем вершину, которая в кратчайшем пути будет предшествовать вершине x_i).

Если $l(x_i) = \infty$ для всех вершин x_i , пометки которых временные, то в исходном графе отсутствуют пути из вершины s в вершины с временными метками. Остановка алгоритма. В противном случае – переход к шагу 4.

4. Превращение пометок в постоянные. Среди всех вершин с временными метками найти такую вершину x_i^* , для которой $l(x_i^*) = \min l(x_i)$ (метка минимальная), и считать эту пометку постоянной. Положить $p = x_i^*$. Пометку $Q(x_i^*)$ также считать постоянной.

5. Если $p \neq t$, перейти к шагу 2, а если $p=t$, то $l(p)$ – длина кратчайшего пути из s в t .

После определения длины кратчайшего пути сам кратчайший путь восстанавливается по постоянным меткам $Q(x_i)$.

Результаты. Задача была реализована на примере снимка БПЛА для участка акватории Норвежского моря на Python. Для удобства изначально была произведена привязка снимка БПЛА к картографической подложке ESRI с помощью библиотеки folium (рис. 5).

Авторам заранее известно о количестве кластеров, поэтому возможно использование сразу кластеризации методом k -средних. В результате кластеризации были выделены 3 кластера: «вода», «надводная часть льда», «подводная часть льда». Для более наглядного результата кластеры были выделены на изображении (рис. 6).

После установки начальной и конечной точки маршрута был запущен расчет оптимального маршрута

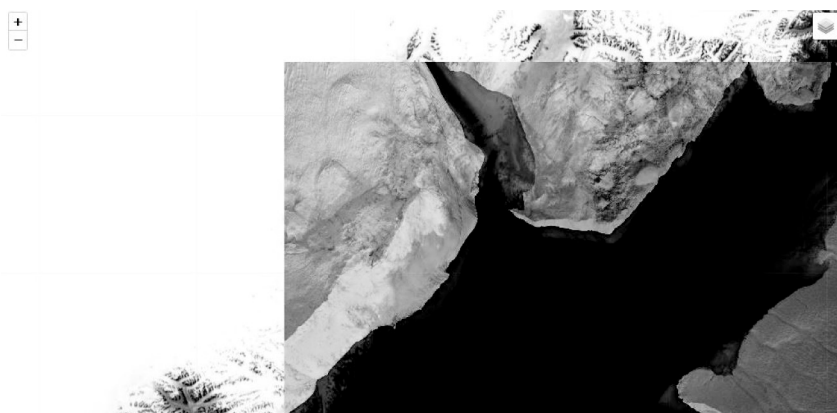


Рис. 5. Снимок с БПЛА участка акватории Норвежского моря с привязкой к картографической подложке ESRI

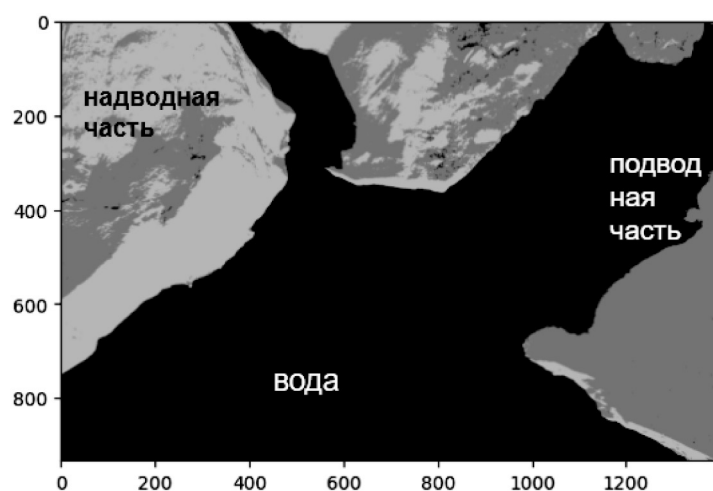


Рис. 6. Снимок с БПЛА участка акватории Норвежского моря после кластеризации методом k -средних ($k=3$)

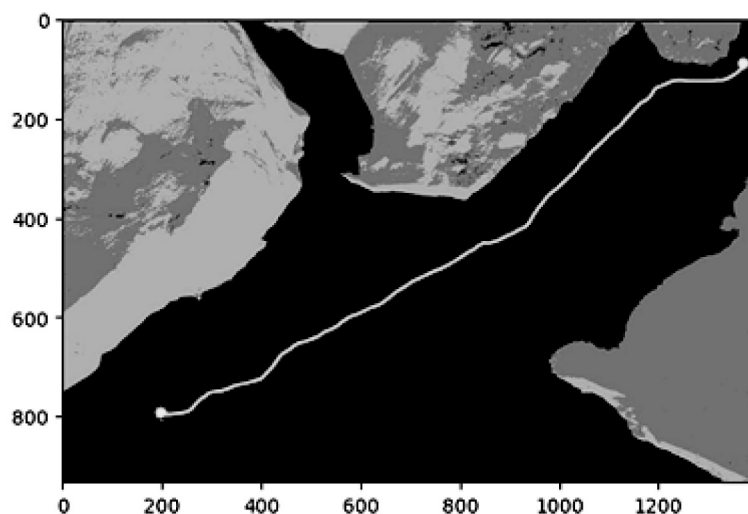


Рис. 7. Снимок БПЛА участка акватории Норвежского моря с построением оптимального маршрута

[[196 175 170]

[189 173 174]

[182 173 176]

...

[35 63 64]

[64 79 84]

[73 70 79]]

...

Найден следующий лучший маршрут с ценностью 11.

Рис. 8. Результаты поиска кратчайшего маршрута по алгоритму Дейкстры с указанием ценности оптимального маршрута

по алгоритму Дейкстры только по кластеру «воды», так как кластер «подводная часть льда» является потенциально небезопасной в морской логистике в условиях ледовой обстановки [7–9]. Оптимальный маршрут воспроизводится на снимке с указанием ценности маршрута, оцененного в условных единицах, связанных со значениями растрового изображения (рис. 7–8). Полученный маршрут для целесообразности по отношению к лоцманским службам был сглажен методом кубического сплайна.

Заключение

Применением представленной методики обработки и поиска оптимального пути на морских акваториях в условиях ледовой обстановки по данным беспилотных летательных аппаратов совмещает простоту и надежность полученных результатов. Несмотря на выбор базовых алгоритмов обработки и анализа данных [10], для методики были получены хорошие результаты построения оптимального маршрута и выполнены основные условия безопасности – отсутствие на маршруте ледовых объектов и образований.

Литература

1. Оценка изменчивости климатических характеристик Карского моря для безопасного и эффективного использования северного морского пути / Е.П. Истомин, Я.А. Петров, И.А. Мартынь, Е.С. Новожилова. – Геоинформатика. – 2024. – № 2. – С. 45–53.
2. Федосеева, Н. А. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов / Н.А. Федосеева, М.В. Загвоздкин // Научный журнал. – 2017. – № 9 (22). – С. 26–29.
3. Геопространственные аспекты управления развитием территории / Е.П. Истомин, М.А. Жарикова, Е.С. Новожилова [и др.] // Процессы в геосредах. – 2023. – № 2 (36). – С. 2006–2012.
4. Consumer and commercial drones – statistics and facts // Statista. – URL : <https://www.statista.com/topics/7939/drones/> (дата обращения: 01.12.2024).
5. Investigation into UAV applications for environmental ice detection and de-icing technology / Q. Li, Z. Chai, R. Yao [et al.] // Drones. – 2025. – Vol. 9, No. 1. – P. 5.
6. Обзор современных достижений в фотограмметрии и аэрофотосъемке / И.А. Хабарова, Д.А. Хабаров, И.Д. Яворская, И.Н. Иванов // Международный журнал прикладных наук и технологий INTEGRAL. – 2019. – № 4-2. – С. 2.
7. Соловьев, В. В. Поиск кратчайшего пути с учетом загруженности дорог / В.В. Соловьев, М.И. Пак // Сборник трудов XI Всероссийской научной конференции молодых ученых аспирантов и студентов (Таганрог, 05–07 декабря 2013 г.). – Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2013. – С. 65–69.
8. RouteView 2.0: a real-time operational planning system for vessels on the Arctic Northeast Passage / A. Wu, T. Che, J. Chen [et al.] // Environmental Modelling & Software. – 2025. – Vol. 169. – P. 106464.
9. Exploring amorphous alloys: advanced electron microscopy and cluster analysis / S. Dagim, E.V. Pustovalov, A.N. Fedorets, A.M. Frolov // Computational Nanotechnology. – 2024. – T. 11, No. 1. – P. 112–120.
10. Changes in the Arctic traffic occupancy and their connection to sea-ice conditions from 2015 to 2020 / Y. Liu, H. Luo, C. Min [et al.] // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No. 7. – 1157.