

УДК 550.8.024, 51-73

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ МОРСКИХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ С ДОННЫМИ СТАНЦИЯМИ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

© 2022 г. С.В. Зайцев^{1,2}, С.А. Тихоцкий^{1,3}, А.В. Силаев^{1,2}, А.А. Ананьев¹,
Д.В. Ужегов¹, И.Ю. Кудряшов^{1,2}, Б.В. Васекин^{1,2}, С.И. Кондрашенко^{1,2},
А.Н. Хлюпин¹, Д.А. Кулыгин^{1,2}, С.О. Базилевич⁴

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Россия

² ООО «Инжиниринговый центр МФТИ по полезным ископаемым», г. Долгопрудный, Россия

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

⁴ АО «МАГЭ», г. Москва, Россия

Автор для переписки: С.В. Зайцев (e-mail: zay.ser.vl@gmail.com)

Представлен алгоритм оптимизации траекторий и последовательности движения флота морских сейсморазведочных судов при решении задачи морской сейсморазведки с использованием донных станций, основанный на решении задачи коммивояжёра со смешанной доставкой и сбором товара, известной в литературе как *TSPDC (Traveling Salesman Problem with mixed Delivery and Collections)*. Приведено описание расширения алгоритма на задачу, принимающую во внимание статические закрытые зоны, которые моделируют ледовую и метеорологическую обстановку, непригодную для движения судна. Алгоритм с применением путей Дубинса обеспечивает близкий к минимальному путь, учёт реальных характеристик движения судов и их скорости при выполнении различных типов работ (укладка донных станций, сбор станций, маневрирование и т.д.).

Научная новизна исследования заключается в применении решения задачи *TSPDC* к задачам морской геофизики с условием наличия закрытых зон и разработке алгоритма оптимизации работ сейсмических судов с использованием донных станций, что актуально в условиях арктического шельфа в период ограниченной навигации. Описанный в статье алгоритм позволяет учитывать возврат судна для сбора оборудования при работе с донными станциями в транзитной зоне. Разработанный алгоритм планирования проведения морских сейсморазведочных работ лёг в основу прикладного программного обеспечения. Приводится формализация задачи, результаты работы алгоритма и примеры планирования на тестовых данных. Затронуты вопросы о допустимых ограничениях для предложенного алгоритма. Полученные результаты применимы для дальнейшего использования при реализации задач по оптимизации плана работ сейсморазведочной морской съёмки с несколькими судами как при планировании сейсморазведочных работ, так и при корректировке планов непосредственно на судне. Применение также оправдано в случае необходимости повторного захода на профиль (например, при повторной обработке бракованного участка работ).

Ключевые слова: морская сейсморазведка, планирование сейсмических исследований, транзитная зона, оптимальное планирование, искусственный интеллект, алгоритмы оптимизации, путь Дубинса, задача коммивояжёра.

Введение

Морские сейсмические исследования в условиях арктического шельфа и короткого периода навигации требуют от сервисных компаний максимальной оптимизации времени выполнения работ. Существующие алгоритмы планирования предоставляют пользователю возможность построения наилучшего маршрута для одного судна при

проведении морских сейсмических 3D-работ [Caillau et al., 2019; Vermeer, 2003; Dokht, Hamidreza, Talebi, 2013], тогда как в настоящее время распространяется методика использования донного оборудования для транзитной зоны, в которой применяется два типа судов – суда-источники и суда-раскладчики. При этом, в случае судна-источника каждый из отрезков маршрута должен быть пройден ровно один раз для генерации сейсмических сигналов, а в случае судов-раскладчиков нужно не только разложить донные станции, но и собрать их после проведения съёмки. В такой ситуации требуется расчёт не только минимального маршрута прохождения системы профилей, но и оптимизация возврата судов для сбора станций и их раскладки. Особенно актуальна данная задача при наличии ограничений на общее количество датчиков на судне.

Санкционная политика в отношении российских нефтяных и сервисных компаний ставит порой непреодолимые барьеры на пути свободного использования зарубежного программного обеспечения, в том числе программного обеспечения по планированию морских сейсморазведочных работ с донными станциями. В связи с этим, важна разработка отечественных систем поддержки принятия решений при проведении морских сейсморазведочных работ. К тому же существующие зарубежные продукты не лишены недостатков, имеют ограниченный функционал, не отвечающий современным потребностям сервисных компаний, прежде всего, ведущих сейсморазведку в транзитной зоне.

Кроме того, необходимо учитывать технические ограничения (различные скорости судов при работе и движении между профилями, минимальный радиус разворота, число используемых станций каждым из судов-раскладчиков), статические запрещённые зоны (суша/мелководье) и динамические запрещённые зоны (навигационные предупреждения краткого срока действия по районам морей, омывающим берега России, погодные условия и др.).

Прежде чем давать формальное (математическое) объяснение задачи, приведём её практическую постановку. Задача планирования пути состоит в поиске оптимальной последовательности прохождения судном профилей сейсморазведки с учётом ограничений на радиус поворота судна (R) статических зон, в которые запрещён заход судов.

Профили нужно проходить целиком от начала до конца, при этом на каждом профиле укладывается оборудование (донные станции), которое затем должно быть собрано и, количество которого (C_{\max}) на корабле ограничено. Таким образом, необходимо учесть, что каждый профиль должен быть пройден дважды: при укладке и при сборе оборудования. Типичная траектория движения судна приведена на рис. 1.

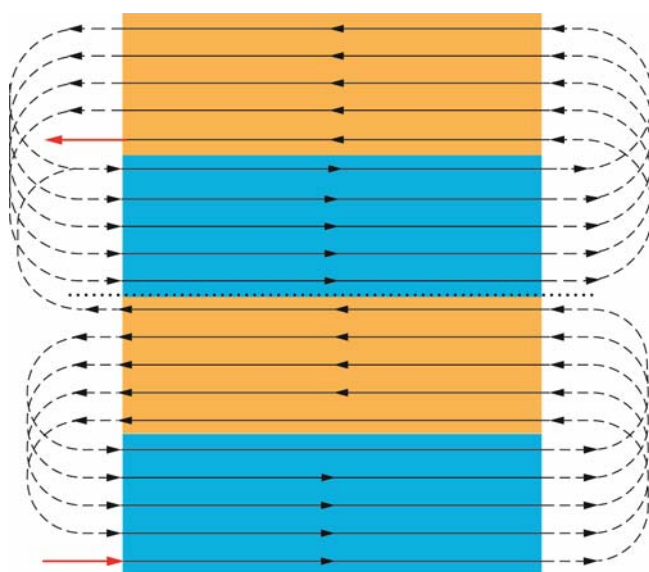


Рис. 1. Пример типичной траектории движения судна. Красные стрелки – начало и конец движения судна; сплошные линии – движение судна по профилям сейсморазведки; пунктир – траектория разворота судна с направлением движения; синяя и оранжевая области – различные полосы движения судна

Fig. 1. An example of a typical ship trajectory. Red arrows – the beginning and end of the ship movement; solid lines – ship movement along seismic profiles; dotted line – the trajectory of the turn of a ship with the movement direction; blue and orange areas – different paths of the ship

Математическая постановка задачи

В описанной выше постановке задача представляет собой расширение задачи коммивояжёра *TSP* (*Traveling Salesman Problem*), которая известна в литературе как *TSPDC* (*Traveling Salesman Problem with mixed Delivery and Collections*) и сформулирована в работе [Baldacci, Hadjiconstantinou, Mingozzi, 2003] следующим образом: существует множество потребителей и множество производителей некоторого ресурса, для которых задано количество потребляемого и производимого ресурса. Необходимо построить оптимальный по времени маршрут, проходящий через все узлы по разу так, что ресурс забирается у производителей и доставляется потребителям. При этом ёмкость транспорта ограничена, а маршрут начинается и заканчивается в некотором терминальном узле. В случае с морскими судами ресурсом служит оборудование, которое необходимо раскладывать на профиль и затем собирать. Таким образом, каждый профиль в задаче сначала выступает в качестве потребителя, а потом – производителя ресурса.

Пусть задано множество профилей $L = \{l_1, \dots, l_n\}$, где n – количество профилей. Для каждого профиля требуется некоторое количество оборудования c_i , притом всего доступно для использования C_{\max} оборудования. Введём множество $R = \{r_1, \dots, r_n\}$, соответствующее повторному проходу профилей при сборе оборудования. Под туром будем понимать последовательность $T = \{l_{i_1}, \dots, l_{n_1}, r_{j_1}, \dots, r_{j_{n_1}}, l_{i_{n_m-1+1}}, \dots, l_{i_{n_m}}, r_{j_{n_m-1+1}}, \dots, r_{j_{n_m}}\}$, в которой каждая подпоследовательность $T = \{l_{i_{n_k-1+1}}, \dots, l_{i_{n_k}}, r_{j_{n_k-1+1}}, \dots, r_{j_{n_k}}\}$ содержит последовательность обхода n_k профилей при укладке и дальнейшем сборе оборудования с тех же профилей так, что $r_{j_{n_k-1+1}}, \dots, r_{j_{n_k}}$ получается перестановкой из $l_{i_{n_k-1+1}}, \dots, l_{i_{n_k}}$. При этом n_k зависит от количества оборудования на корабле – как только оборудование заканчивается, начинается его сбор. Задача оптимизации состоит в обнаружении тура такой минимальной длины, чтобы выполнялось следующее ограничение:

$$\sum_{i_{n_k-1+1}}^{i_{n_k}} c_j < C_{\max} \text{ для } k=1, \dots, m. \tag{1}$$

Каждый профиль $l_i \in L$ может быть разбит на три физических вершины – начало, середина, конец – $\{v_{i,1}, v_{i,2}, v_{i,3}\}$, каждая из которых может находиться в двух состояниях: укладка или сбор оборудования (рис. 2). Следовательно, для осуществления укладки на профиль (участок графа) нужно, чтобы запаса оборудования (донных станций) на судне было достаточно. Запишем это условие в виде $C_{cur} \geq 3$, где 3 – количество узлов на графе. В общем случае проверку можно проводить для произвольного количества донных станций, необходимых для выхода на профиль.

Рис. 2. Разбиение профиля l_i на вершины графа $\{v_{i,1}, v_{i,2}, v_{i,3}\}$

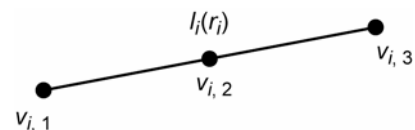


Fig. 2. Partitioning of l_i profile into graph nodes $\{v_{i,1}, v_{i,2}, v_{i,3}\}$

Для постановки задачи в терминах *TSP* предлагается ввести два графа $G_s = (V_s, E_s)$ и $G_c = (V_c, E_c)$, $|V_c| = |V_s| = 3n$, такие, что i -я вершина в обоих графах соответствует одной физической вершине в разных состояниях (укладка и сбор оборудования). Таким образом, вместо повторного посещения вершин в физическом графе, необходимо построить

TSP тур на графе $G = G_s \cup G_c \cup G_0$, где G_0 – состоящий из одной вершины v_0 , которая характеризует порт (точку старта и возврата) и набора рёбер, соединяющих единственную вершину с остальными вершинами графа G . При этом при посещении вершин из множества V_c текущее количество оборудования увеличивается ($C_{cur} = C_{cur} + 1$), при посещении вершин из множества V_s – уменьшается ($C_{cur} = C_{cur} - 1$).

Наиболее важный элемент для постановки задачи – определение весов рёбер между вершинами, которые будут зависеть от текущего запаса оборудования $C_{cur} < C_{max}$. Определим последовательно стоимости рёбер внутри каждого графа E_s, E_c , а потом между графами $E_{sV}, (V_c, V_s)E_0$.

$$E_s(v_{i,k}^s, v_{j,l}^s) = \begin{cases} Distance(v_{i,k}^s, v_{j,l}^s), & \text{если } i = j; k \in \{1, 3\}; l = 2; \\ DubinsPath(v_{i,k}^s, v_{j,l}^s), & \text{если } C_{cur} \geq 3; i \neq j; k, l \in \{1, 3\}; \\ \infty, & \text{если } C_{cur} < 3; i \neq j; k, l \in \{1, 3\}; \\ \infty, & \text{если } \forall C_{cur}; i \neq j; l = 2. \end{cases} \quad (2)$$

Первое условие обозначает движение вдоль профиля, второе – переход между профилями, длина которого вычисляется с помощью построения кривой минимальной длины в плоскости, удовлетворяющей ограничениям на радиус поворота – из вершины в направлении, совпадающем с направлением профиля, с которого осуществляется переход, в вершину нового профиля с соответствующим ему направлением. Построение кривой минимальной длины с подобными ограничениями – распространённая задача с известным решением. В предлагаемой методике решения используется алгоритм построения путей Дубинса на основе работы [Dubins, 1957]. Третье условие накладывает ограничение на текущий запас оборудования, т.е. судно не зайдёт на профиль, если для этого недостаточно оборудования. Четвёртое – на любой переход из центра линии. Это соответствует тому, что любой начатый профиль необходимо закончить. Составленная матрица весов графа является симметричной.

$$E_c(v_{i,k}^c, v_{j,l}^c) = \begin{cases} Distance(v_{i,k}^c, v_{j,l}^c), & \text{если } i = j; k \in \{1, 3\}; l = 2; \\ DubinsPath(v_{i,k}^c, v_{j,l}^c), & \text{если } C_{cur} + 3 \leq C_{max}; i \neq j; k, l \in \{1, 3\}; \\ \infty, & \text{если } C_{cur} + 3 > C_{max}; i \neq j; k, l \in \{1, 3\}; \\ \infty, & \text{если } \forall C_{cur}; i \neq j; l = 2. \end{cases} \quad (3)$$

Матрица весов рёбер E_c аналогична E_s за исключением того, что производится сбор донных станций и бесконечный вес ребра появляется в случаях, когда судно не сможет собрать оборудования больше, чем способно перевезти. Сразу стоит оговориться, что такая ситуация возникнет в текущей постановке, если судно выйдет на сейсмическую съёмку с ограниченным запасом оборудования C_{max} . Это может быть важно при возможных дальнейших расширениях алгоритма для нескольких кораблей. Далее определим матрицу переходов между графами.

$$E_{sc}(v_{i,k}^x, v_{j,l}^y) = \begin{cases} DubinsPath(v_{i,k}^x, v_{j,l}^y), & \text{если } C_{cur} + 3 \leq C_{max}; i \neq j; k, l \in \{1, 3\}; x = c; y = s; \\ DubinsPath(v_{i,k}^x, v_{j,l}^y), & \text{если } C_{cur} - 3 \leq 0; i \neq j; k, l \in \{1, 3\}; x = s; y = c; \\ \infty, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (4)$$

Из определения матрицы видно, что она не симметрична. Кроме того, проводится упрощение условия на сбор и укладку – судно выкладывает оборудование пока оно не закончится, а собирает до тех пор, пока не заполнится всё свободное пространство.

Переходы от вершины v_0

$$E_s(v_{i,k}^x, v_0) = \begin{cases} \text{DubinsPath}(v_{i,k}^x, v_0), & \text{если } k \in \{1, 3\}; x = s; \\ \infty, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5)$$

Такие веса рёбер обоснованы тем, что на старте алгоритма судно находится в порту и всё оборудование расположено на нём, следовательно, в сборе оборудования нет необходимости.

Задачу можно формализовать как *TSP* задачу на общем графе G . Построим путь в графе X :

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если переход из вершины } i \text{ в } j \text{ есть в туре;} \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad (6)$$

такой, что

$$\sum_{i=1}^{n'} \sum_{\substack{j=1, \\ i \neq j}}^{n'} e_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{i=1, \\ i \neq j}}^{n'} x_{ij} = 1, i = 1, \dots, n', \quad (8)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{\substack{j \in Q, \\ i \neq j}} x_{ij} \leq |Q| - 1, \forall Q \subset \{1, \dots, n'\}, |Q| \geq 2, \quad (9)$$

где $n' = 6n$ – количество узлов в графе G ; e_{ij} – стоимость прохода через граф. Данная задача является *NP*-сложной и получить её точное решение для графов большой размерности за разумное время затруднительно.

Так как из точки старта первый шаг возможен только к узлам графа V_s , где запас ресурсов C_{cur} уменьшается, то можно передвигаться по этим вершинам пока запаса достаточно. Таким образом, начальное приближение для первой итерации алгоритма состоит из решения задачи *TSP* от точки старта до финиша. Дальнейший алгоритм основан на итеративном запуске решения задачи коммивояжёра *TSP* на графе с последовательным удалением вершин и рёбер. В результате, на каждой итерации размерность задачи уменьшается. Каждая следующая итерация заключается в выборе судном-укладчиком при завершении прохода графа двух сценариев работы: раскладка оборудования или его сбор. В случае, когда профиль пройден два раза (оборудование разложено и собрано) с текущего момента происходит перестройка решения задачи *TSP* по алгоритму, описанному выше. Однако, число вершин графов будет на n меньше, где n – количество вершин графов, которые были пройдены дважды. Более подробное описание итеративного алгоритма для случая с донными станциями представлено в статье [Зайцев и др., 2021a]. Рассматриваемый алгоритм позволяет построить решение, не противоречащее опыту производственных работ и близкое к оптимальному по порядку величины длины маршрута. Кроме того, данный алгоритм может быть расширен на более сложные случаи учёта дополнительных ограничений и закрытых зон (об этом речь пойдёт ниже в соответствующем разделе статьи).

Для решения прямой задачи *TSP* на каждой итерации алгоритма использовалось открытое программное обеспечение *Concorde TSP Solver*¹, которое было успешно применено в задачах генного картирования, прогнозирования функций белка, маршрутизации транспортных средств, преобразования растровых изображений в чертежи

¹ <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/concorde.html>

непрерывных линий и при изучении масштабирующих свойств задач комбинаторной оптимизации. Кроме того, это один из самых быстрых решателей *TSP* для крупных задач, существующих в настоящее время.

Эффективность *Concorde TSP Solver*, применительно к задаче планирования морской сейсморазведки, продемонстрирована в работе [Gutin et al., 2003], где проводилось сравнение с иными эвристическими методами решения задачи эффективного планирования сейсморазведочных работ в схожей постановке.

Результаты

В данном разделе представлены результаты работы предложенного алгоритма и их анализ для различных случаев – как простых синтетических, так и реальных практических. Вначале приведено несколько синтетических примеров, затем продемонстрирована работа алгоритма на реальных данных¹. Стоимость маршрутов для синтетических случаев определялась с помощью длины маршрута. На реальном примере сравнивались различные значения максимального количества выложенных профилей, а стоимость маршрута рассчитывалась в у.е. (близко к реальной), как стоимость аренды корабля и оборудования за всё время выполнения работы, которое вычислялось, исходя из длины пути корабля и его скорости. Для каждого рассмотренного ниже случая проведено сравнение работы двух алгоритмов. Первый алгоритм состоит в простом повторении обхода профилей, которые судно прошло до этого в процессе укладки в том же самом порядке. Второй – алгоритм, рассмотренный выше и являющийся основным в данной работе.

Начнем с простого синтетического случая: четыре параллельных горизонтальных профиля длиной 1 км, максимальное количество одновременно уложенных профилей $k=2$, радиус разворота корабля 50 м (рис. 3, слева).

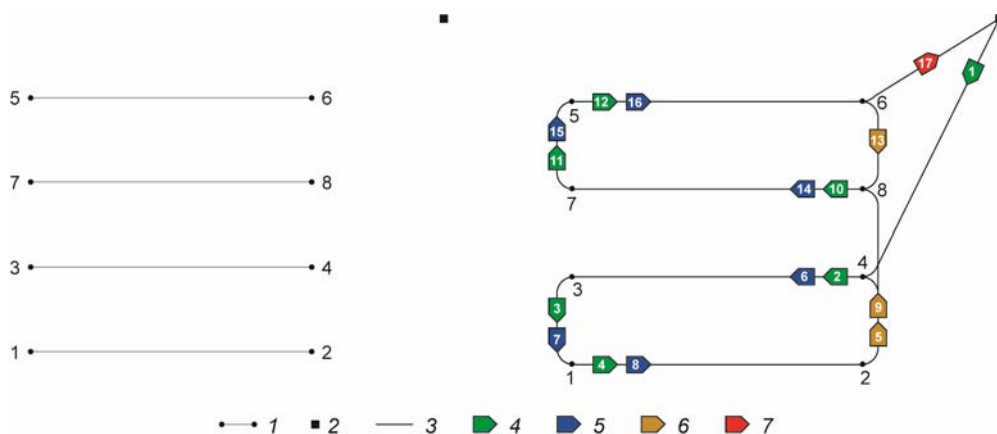


Рис. 3. Простой синтетический пример: начальное состояние (слева) и решение (справа). 1 – профиль; 2 – порт; 3 – полный маршрут корабля; 4–7 – тип процесса: укладка оборудования или переход на профиль для укладки (4); сбор оборудования или переход для сбора (5); переход со сменой типа процесса (6); возвращение в порт (7); цифры на стрелках – очередность действия

Fig. 3. Simple synthetic example: initial state (on the left) and solution (on the right). 1 – profile; 2 – port; 3 – full route of the ship; 4–7 – type of process: installation of equipment or switching to a profile for installation (4); collection of equipment or switching for collection (5); transition with change of process type (6); return to the port (7); the numbers on the arrows – the order of action

¹ U.S. Geological Survey <https://walrus.wr.usgs.gov/namss/survey/b-08-77-fl/> (Дата обращения: 01.04.2021)

Для подобного простого случая оба алгоритма дают одинаковое решение (рис. 3, *справа*), так как после установки оборудования судно не может начать его сбор, т.е. для случая с $k=2$ существует единственный вариант – сбор оборудования с первого уложенного профиля.

Перейдём к более сложным примерам (рис. 4).

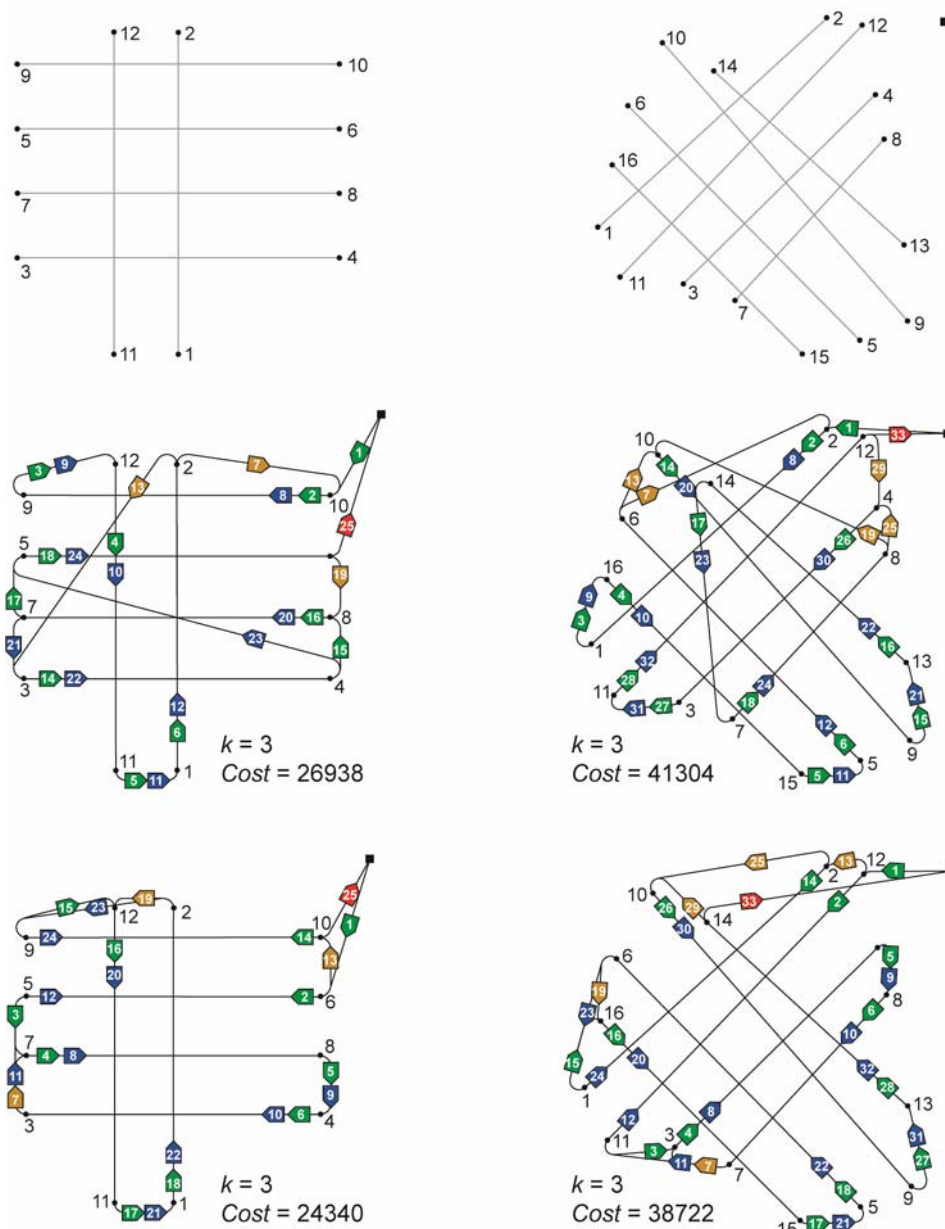


Рис. 4. Сложные синтетические примеры № 1 (*слева*) и № 2 (*справа*). *Вверху*: начальное состояние; *по центру*: решение первого алгоритма; *внизу*: решение второго алгоритма. Здесь и на рис. 5 под схемами – максимальное количество одновременно уложенных профилей k и стоимость маршрута ($Cost$, у.е.). Условные обозначения см. на рис. 3

Fig. 4. Complex synthetic examples № 1 (*on the left*) and № 2 (*on the right*). *Above*: initial state; *in the center*: solution of the first algorithm; *below*: solution of the second algorithm. Here and in Fig. 5 under the schemes – the maximum number of simultaneously installed profiles k and the cost of the route ($Cost$, c.u.). Notations see in Fig. 3

Пример № 1: два перпендикулярных блока с параллельными профилями одинаковой длины (1 км), $k=3$, радиус поворота корабля 50 м (см. рис. 4, *слева*). Пример № 2: два блока не параллельных линий разной длины, радиус поворота и k аналогичны примеру № 1 (см. рис.4, *справа*).

Количество шагов (CS) в алгоритме зависит только от количества профилей (CP): $CS = 4(CP) + 1$. Множитель 4 возникает из-за того, что на каждый профиль есть переход, кроме того, каждый профиль необходимо пройти дважды – провести укладку и сбор оборудования. К этому добавляется ещё один шаг – возвращение в порт. Поэтому количество шагов одинаково для разных оптимальных маршрутов, однако они значительно отличаются. Поиск лучшей точки выхода из маршрута сбора оборудования позволяет найти более дешёвый вариант обхода профилей и экономит от 6 до 10 % в данных примерах. Маршрут выглядит проще и не имеет переходов, пересекающих всю область.

Рассмотрим далее реальный план на проведение сейсмических работ (рис. 5): 25 профилей, средняя длина профиля 95 км, радиус поворота корабля 5 км. Все расчёты выполнялись с использованием второго алгоритма.

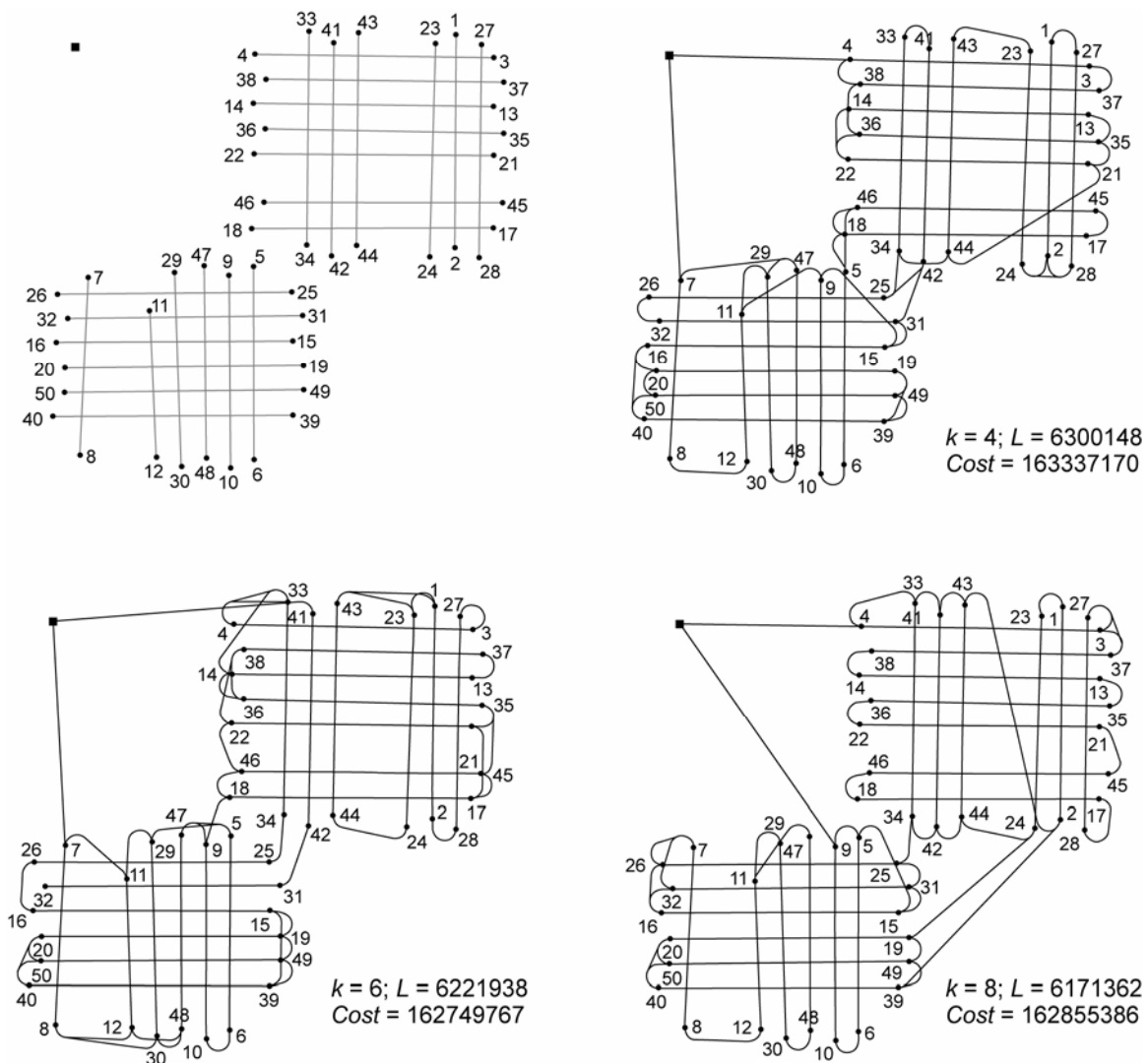


Рис. 5. Пример работы алгоритма на реальных данных с указанием длины маршрута (L , м)

Fig. 5. An example of an algorithm operation on real data, indicating the route length (L , m)

График зависимости стоимости аренды для различных значений максимального количества уложенных профилей k представлен на рис. 6. Стоимость аренды рассчитывалась следующим образом:

$$Cost = \frac{L}{86400 \cdot V} (kC_{eq} + C_{ship}) \quad (10)$$

где L – длина маршрута; V – скорость корабля (полагаем константой 1 м/с), 86400 – множитель для перевода секунд в сутки; C_{eq} – стоимость аренды оборудования на один профиль в сутки ($C_{eq}=10000$); C_{ship} – стоимость аренды корабля в сутки ($C_{ship}=2200000$). Так как при увеличении k длина маршрута уменьшается, но при этом увеличивается время проведения работ, то существует оптимальное значение k , которое можно найти.

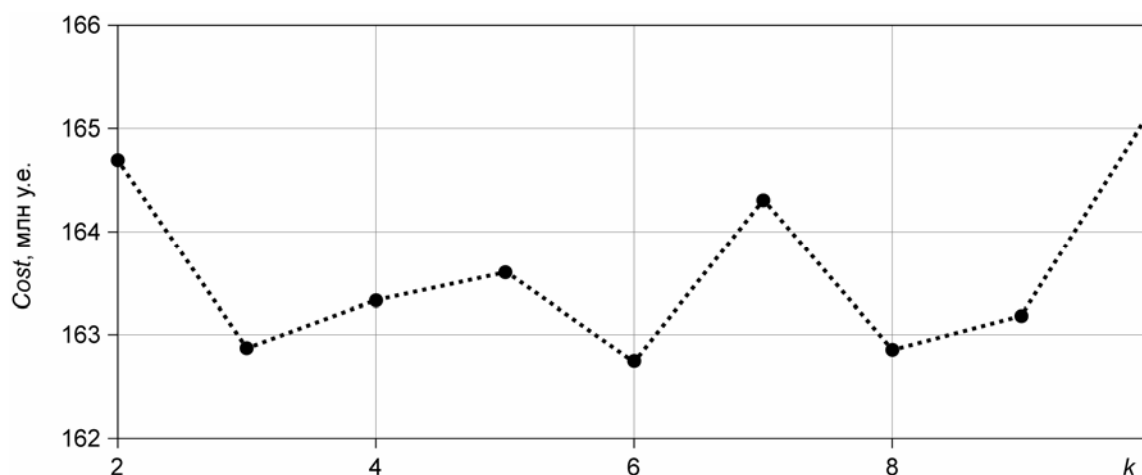


Рис. 6. График зависимости стоимости аренды ($Cost$, млн у.е.) от максимального количества уложенных профилей k

Fig. 6. Graph of the rent cost dependence ($Cost$, million c.u.) on the maximum number of installed profiles k

Как можно видеть на графике, увеличение максимального количества уложенных профилей k не всегда приводит к уменьшению длины общего маршрута. Это связано с тем, что в каждой секции разное количество профилей не кратное k . В результате, могут возникать длинные переходы между секциями или пересекающие секцию, как в примере на рис. 4, *по центру*. Также на графике видно, что оптимальное значение параметра k для данного примера – 6.

Учёт закрытых зон

Одна из задач при планировании движения судов в условиях арктического шельфа – обход статических (неизменных во времени) закрытых зон, т.е. областей пространства, куда судно зайти не может. Причинами запрета могут служить сложная ледовая обстановка, нормативные ограничения или завершение периода навигации.

При обходе закрытой зоны необходимо принимать во внимание два требования:

- сохранение максимума информации (длины целевого профиля);
- учёт радиуса разворота судна.

Закрытая зона в предлагаемом алгоритме представляется выпуклым многоугольником. Для любого невыпуклого препятствия его закрытая зона должна быть изменена до выпуклой оболочки. Если выпуклая оболочка препятствия пересекается с профилем,

то у него нужно удалить ту часть, которая находится внутри выпуклой оболочки. В результате, профиль может быть разбит на два новых или укорочен с одной стороны (рис. 7).

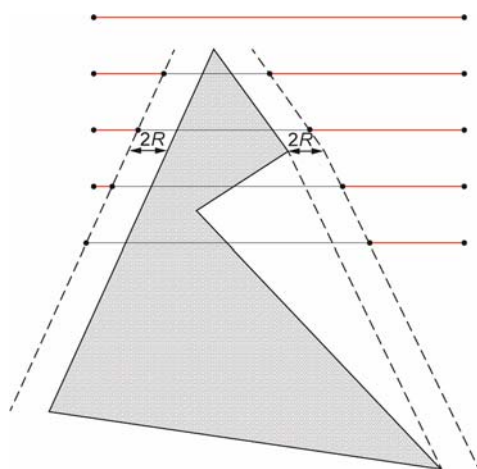


Рис. 7. Пример обрезки профилей, попадающих на закрытую зону (показана серым цветом здесь и далее). Красные линии – профили после обрезки на границе закрытой зоны; пунктир – её выпуклая оболочка; R – радиус разворота судна

Fig. 7. An example of cutting profiles that fall into a closed area (shown in gray here and below). Red lines – profiles after cutting at the border of closed zone; the dotted line is its convex shell; R is the turning radius of the ship

Дополнительно следует обрезать части профилей, которые находятся близко к закрытой зоне, так как судно, а следовательно, и траектория, имеют ограниченный радиус разворота R . Удаляем часть профиля, прилегающую к ближайшей точке пересечения прямой вдоль профиля и закрытой зоны на расстояние αR , $\alpha > 1$, где α – масштабный коэффициент. Эмпирическим путём было установлено, что для большинства случаев достаточно $\alpha = 2$. Однако, у подобного подхода имеются ограничения, которые будут продемонстрированы ниже в разделе “Обсуждение результатов”.

Сначала по представленному выше алгоритму вычисляется путь без учёта закрытых зон. Чтобы проверить пересечение пути Дубинса и закрытой зоны, кривую разбивают на небольшие отрезки одинаковой длины. Длина отрезков должна быть подобрана так, чтобы на возможной окружности в пути Дубинса укладывалось большое количество точек. Если хотя бы один из таких отрезков пересекается с закрытой зоной, то необходимо обходить препятствие.

Ниже приведён формализованный алгоритм построения маршрута одного судна в обход закрытой зоны.

Шаг 1. Для начальной точки A и конечной точки B находим две точки пересечения C_1 и C_2 с закрытой зоной; C_1 ближе к точке старта судна, чем C_2 .

Шаг 2. Все точки закрытой зоны разделяем на две группы – с одной и другой стороны от прямой C_1C_2 (обход с двух возможных сторон). Для каждой из групп сортируем точки по увеличению проекции на линию C_1C_2 .

Шаг 3. Дополнительно необходимо сдвинуть каждую точку от закрытой зоны на некоторое заданное расстояние Δ и посчитать касательную $\overrightarrow{\tan}_i$ для пути Дубинса (рис. 8). Для каждой точки D_i из группы:

$$\overrightarrow{n}_1 = \frac{\overrightarrow{D_{i-1}D_i}}{|\overrightarrow{D_{i-1}D_i}|}, \quad \overrightarrow{n}_2 = \frac{\overrightarrow{D_iD_{i+1}}}{|\overrightarrow{D_iD_{i+1}}|}, \quad (11)$$

$$D_i = D_i + (\overrightarrow{n}_1 - \overrightarrow{n}_2) \Delta, \quad (12)$$

$$\overrightarrow{\tan}_i = \frac{\overrightarrow{n}_1 + \overrightarrow{n}_2}{|\overrightarrow{n}_1 + \overrightarrow{n}_2|}. \quad (13)$$

Для D_0 и D_N : $D_{-1} = A$, $D_{N+1} = B$.

Рис. 8. Сдвиг точки от закрытой зоны. \vec{up} – кратчайшее расстояние от \vec{tan} до пути Дубинса. Остальные пояснения см. в тексте

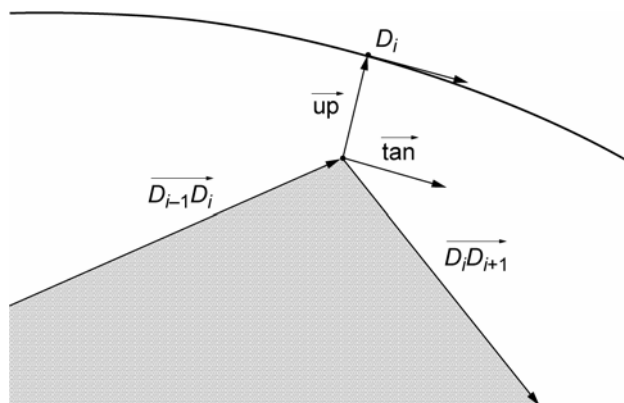


Fig. 8. Shift of the point from the closed zone. \vec{up} is the shortest distance from \vec{tan} to the Dubins path. For other explanations see the text

Шаг 4. Итоговый путь строится из $N+1$ последовательных путей Дубинса через точки $A, D_0, D_1, \dots, D_N, B$. Из итоговых путей, построенных для каждой их двух групп, выбираем более короткий (рис. 9).

Рис. 9. Обход закрытой зоны из точки A в точку B . Пояснения см. в тексте

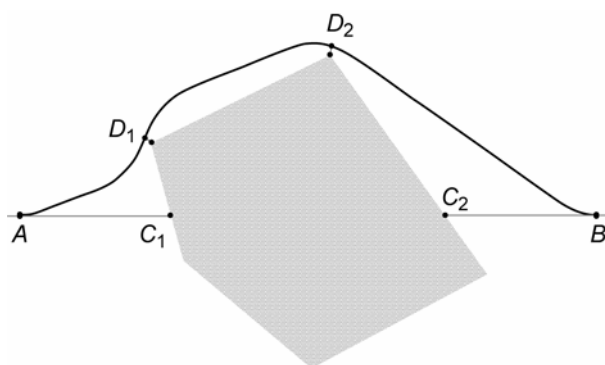


Fig. 9. Bypassing the closed area from point A to point B . For explanations see the text

Если на прямой между начальной и конечной точками препятствий нет, то пересечения C_1C_2 не будет и в качестве пути будет принят путь Дубинса без учёта закрытой зоны. Однако при вычислении его длины дополнительно добавится штраф – величина, заведомо на порядок превышающая длину любого пути Дубинса для всех точек. Прибавление штрафа гарантирует, что рёбра графа с такими пересекающимися препятствие путями будут иметь большой вес и не будут выбраны для итогового маршрута.

Обсуждение результатов

Для обхода нескольких выпуклых препятствий, так же, как и для одного, изначально вычисляется путь с применением путей Дубинса без этих препятствий и проверяется пересечение с каждым из них. Для каждого из пересекающихся с кривой многоугольников строится путь по алгоритму обхода, описанному в шагах 1–4. Если среди построенных путей есть не пересекающиеся с препятствиями, то среди них выбирается наиболее короткий. В противном случае предпочтение отдаётся самому короткому из всех построенных путей, но к его длине прибавляется штраф. В отличие от одиночного препятствия, нельзя гарантировать, что алгоритм не выберет этот путь для итогового маршрута в случае отсутствия наиболее короткого пути. На рис. 10 показан пример, когда все возможные маршруты из начальной точки A будут содержать путь с пересечением закрытых зон.

Как упоминалось ранее, при инициализации закрытой зоны профили обрезаются на величину $\alpha R, \alpha > 1$. Для кривых большинства случаев достаточно коэффициента $\alpha = 2$. Однако в случае, представленном на рис. 11, даже больших значений α недостаточно,

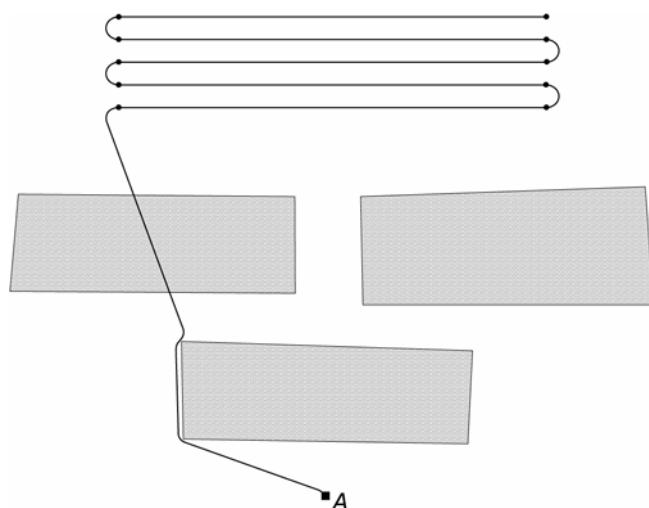


Рис. 10. Пример пересечения препятствий маршрутом для нескольких закрытых зон

Fig. 10. An example of crossing obstacles by a route for several closed areas

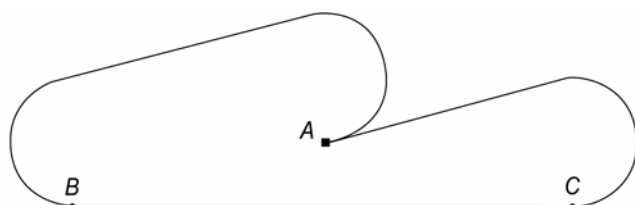
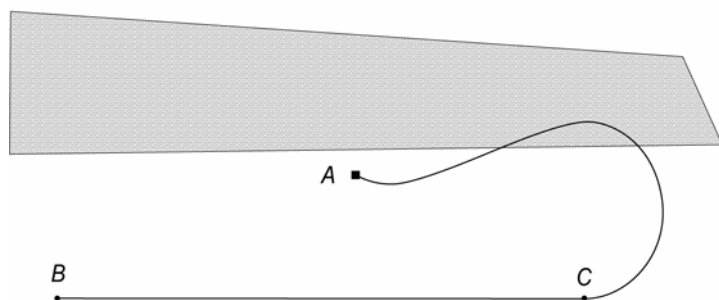


Рис. 11. Пути Дубинса из точки A в точки B и C : маршрут для профиля BC без препятствия (*вверху*) и с препятствием (*внизу*)

Fig. 11. Dubins paths from point A to points B and C : route for profile BC without an obstacle (*above*) and with an obstacle (*below*)



чтобы пути Дубинса не пересекались с препятствием. Для стартовой точки A построен путь Дубинса в каждую из точек профиля. Видно, что для препятствия, изображённого на рисунке, профиль не будет обрезан при любых возможных α , но при этом любая из траекторий, содержащих этот профиль, будет пересекаться с закрытой зоной.

Возможным решением обозначенной проблемы может быть другая стратегия обреза профиля, например, вырезание всех частей профилей, которые содержатся в большом многоугольнике, содержащем исходную закрытую зону. Например, можно расширять границы закрытой зоны аналогично шагу 3 в алгоритме обхода препятствия, где $\Delta = \alpha R$, но это может привести к чрезмерному удалению профилей и, как следствие, потере их информативной части.

Алгоритм обхода множественных препятствий может быть улучшен. Аналогично шагу 1 можно зафиксировать несколько пар точек для нескольких препятствий и реализовать уже описанный выше алгоритм для каждой из этих пар. Однако построенные таким образом маршруты не всегда оптимальны, например, они могут идти вокруг всех препятствий, а наилучший путь будет проходить через центральное пространство между ними.

Существенный недостаток представленного в статье алгоритма состоит в том, что он применим только для выпуклых зон – из-за преобразования к выпуклой оболочке может быть обрезана значительная часть профиля, например, для примыкающих к береговой линии профилей. Возможным решением этой проблемы будет выделение некоторого количества значимых выпуклых частей от исходного препятствия с последующим обходом множественных выпуклых препятствий.

Заключение

Предлагаемый алгоритм построения маршрута позволяет обеспечить оптимальное планирование сейсморазведочных работ с донными станциями. Его использование также оправдано в случае необходимости повторного захода на профиль (например, в случае повторной отработки бракованного участка работ).

В ходе исследований были достигнуты следующие основные результаты.

1. Разработан алгоритм построения оптимальных траекторий для флота морских сейсморазведочных судов на базе путей Дубинса и эвристического решения задачи *TSPDC*. Полученный результат позволяет планировать морские сейсморазведочные работы с донными станциями.

2. Алгоритм дополнен учётом закрытых зон при построении наиболее эффективного плана съёмки. Это позволяет проведение морских сейсмических работ, принимающих во внимание такие быстроменяющиеся параметры, как погода и ледовая обстановка, что немаловажно при освоении континентального шельфа Российской Арктики.

3. Проведено тестирование эффективности алгоритма на синтетических данных и реальных примерах. Показано, что применение алгоритма оптимизирует время и, как следствие, стоимость работ путём сокращения проходимого расстояния.

4. Ограничения алгоритма связаны с учётом зон, закрытых для прохождения судов. Эта часть требует дальнейшей доработки, что возможно при более тщательном тестировании на реальных данных.

В целом, рассматриваемая методика построения наилучшего маршрута может быть пригодна для решения широкого круга прикладных задач. К примеру, в работах [Lugo-Cárdenas et al., 2014; Saunders et al., 2005; Марков, Сима́ньков, 2019] продемонстрировано её использование для оптимизации полётов беспилотного средства в условиях городского рельефа.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть применены при реализации задач по улучшению плана работ сейсморазведочной морской съёмки с несколькими судами. Например, использование нескольких судов-укладчиков, которые могут одновременно укладывать станции на дно и собирать их.

Рассмотренный алгоритм был положен в основу прикладного программного обеспечения “Экспертной системы для оптимального планирования процессов геологоразведки удалённых объектов в реальном времени” [Зайцев и др., 2021б].

Финансирование

Работа выполнена в рамках Программы создания и развития Центра компетенций Национальной технологической инициативы на базе Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) по направлению “Искусственный интеллект” (договор № 13/1251/2019 от 11.09.2019 г.), тема: “Создание программно-аппаратного комплекса с интегрированной экспертной системой для оптимального планирования процессов геологоразведки удалённых объектов в реальном времени”.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Зайцев С.В., Васекин Б.В., Тихоцкий С.А., Силаев С.В., Ананьев А.А., Орлов Р.В., Ужегов Д.Н., Кудряшев И.Ю., Кондрашенко С.И., Базилевич С.О.* Использование алгоритмов искусственного интеллекта для оптимального планирования морских сейсмических работ // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021а. Т. 501, № 2. С.210–218.
- Зайцев С.В., Васекин Б.В., Филиппов Д.Д., Ерофеев А.А., Тихоцкий С.А.* Экспертная система для поддержки принятия оперативных решений при проведении морских сейсмических съёмок / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666605, выдано 18.10.2021б.
- Марков А.В., Симаньков В.И.* Методика расчета траекторий полета беспилотных летательных аппаратов для наблюдения за местностью // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2019. № 4 (122). С.57–63.
- Baldacci R., Hadjiconstantinou E., Mingozzi A.* An Exact Algorithm for the Traveling Salesman Problem with Deliveries and Collections // Networks. 2003. N 42. P.26–41.
- Caillaud J.B., Maslovskaya S., Mensch T., Moulinier T.* Zermelo–Markov–Dubins problem and extensions in marine navigation // 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC). 2019. P.517–522.
- Dokht R., Hamidreza R., Talebi M.* Optimizing 3-D seismic survey design parameters using genetic algorithm – a case study in southwest of Iran // Arabian Journal of Geosciences. 2013. N 6. P.1965–1975.
- Dubins L.E.* On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents // American Journal of Mathematics. 1957. V. 79, N 3. P.497–516.
- Gutin G., Jakubowicz H., Ronen S., Zverovitch A.* Seismic vessel problem // Communications in DQM. 2003. V. 8. 9 p.
- Lugo-Cárdenas I., Flores G., Salaza S., Lozano R.* Dubins path generation for a fixed wing UAV // 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2014. P.339–346. DOI: 10.1109/ICUAS.2014.6842272
- Saunders J., Brandon C., Curtis A., Beard R., McLain T.* Static and Dynamic Obstacle Avoidance in Miniature Air Vehicles // American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). 2005. N 1526. 14 p. DOI: 10.2514/6.2005-6950
- Vermeer G.* Acquisition/Processing – 3D seismic survey design optimization // The Leading Edge. 2003. V. 22, N 10. 9 p.

Сведения об авторах

ЗАЙЦЕВ Сергей Владимирович – старший инженер, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; руководитель проектов, ООО “Инжиниринговый центр МФТИ по полезным ископаемым”. 141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Научный пер., д. 4. Тел.: +7(925) 422-77-16. E-mail: zay.ser.vl@gmail.com

ТИХОЦКИЙ Сергей Андреевич – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, Москва, Россия; главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: +7(926) 538-30-31. E-mail: sat@ifz.ru

СИЛАЕВ Александр Владимирович – старший инженер, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; старший инженер, ООО “Инжиниринговый центр МФТИ по полезным ископаемым”. 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Научный пер., д. 4. Тел.: +7(927) 055-85-79. E-mail: Silaev.av@cet-mipt.ru

АНАНЬЕВ Андрей Андреевич – аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: +7(967) 241-51-69. E-mail: andrey.ananev@phystech.edu

УЖЕГОВ Денис Валерьевич – аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: +7(916) 745-75-51. E-mail: Denis.uzhegov@phystech.edu

КУДРЯШОВ Иван Юрьевич – кандидат физико-математических наук, старший инженер, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; старший инженер, ООО “Инжиниринговый центр МФТИ по полезным ископаемым”. 141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Научный пер., д. 4. Тел.: +7(926) 218-96-70. E-mail: kudryashov.iy@cet-mipt.ru

ВАСЕКИН Борис Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший инженер, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; руководитель отдела, ООО “Инжиниринговый центр МФТИ по полезным ископаемым”. 141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Научный пер., д. 4. Тел.: +7(915) 307-17-72. E-mail: Vasekin.bv@cet-mipt.ru

КОНДРАШЕНКО Станислав Игоревич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; руководитель департамента, ООО “Инжиниринговый центр МФТИ по полезным ископаемым”. 141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Научный пер., д. 4. Тел.: +7(916) 070-16-64. E-mail: kondrashenko.si@cet-mipt.ru

ХЛЮПИН Алексей Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: +7(964) 521-32-64. E-mail: khlyupin@phystech.edu

КУЛЫГИН Дмитрий Александрович – магистр, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; инженер, ООО “Инжиниринговый центр МФТИ по полезным ископаемым”. 141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Научный пер., д. 4. Тел.: +7(985) 630-75-63. E-mail: kulygin.da@cet-mipt.ru

БАЗИЛЕВИЧ Сергей Олегович – начальник отдела морской сейсморазведки, АО “МАГЭ”. 121609, г. Москва, ул. Осенняя, д. 11, бизнес-центр “Крылатский 2”. Тел.: +7(925) 004-02-25. E-mail: sergey.bazilevich@mage.ru

APPLICATION OF OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR SOLVING MARINE SEISMIC SURVEY PLANNING PROBLEMS WITH BOTTOM STATIONS IN THE ARCTIC SHELF

S.V. Zaytsev^{1,2}, S.A. Tikhotskiy^{1,3}, A.V. Silaev^{1,2}, A.A. Ananiev¹,
D.V. Uzhegov¹, I.Yu. Kudryashev^{1,2}, B.V. Vasekin^{1,2}, S.I. Kondrashenko^{1,2},
A.N. Khlyupin¹, D.A. Kulygin^{1,2}, S.O. Bazilevich⁴

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, Moscow Region, Russia*

² *LLC "Center for Engineering and Technology MIPT", Dolgoprudny, Moscow Region, Russia*

³ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

⁴ *JSC "MAGE", Moscow, Russia*

Corresponding author: S.V. Zaytsev (e-mail: zay.ser.vl@gmail.com)

Abstract. The paper presents an algorithm for optimizing the trajectories and movement sequence of a fleet of marine seismic survey vessels in solving the problem of marine seismic surveys using bottom stations, based on solving the traveling salesman problem with mixed delivery and collection of goods, known in the literature as *TSPDC (Traveling Salesman Problem with mixed Delivery and Collections)*. A description of the algorithm extension to a problem that takes into account static closed zones that simulate ice and meteorological conditions unsuitable for the ship movement is given. The Dubins path algorithm provides a path close to the minimum and it takes into account the real characteristics of the ship movement and its speed when performing various types of work (installing bottom stations, collecting stations, maneuvering, etc.).

The scientific novelty of the study lies in the application of the *TSPDC* problem solution to the problems of marine geophysics with the condition of presence of closed zones and the development of an algorithm for optimizing the work of seismic vessels using bottom stations, which is relevant in the conditions of the Arctic shelf during the period of limited navigation. The algorithm described in the article makes it possible to take into account the return of the vessel for collecting equipment when working with bottom stations in the transit zone. The developed algorithm for planning marine seismic surveys formed the basis of the application software.

The formalization of the problem, the results of the algorithm and examples of planning on test data are given. Additionally, the possible limitations for the developed algorithm are raised.

The obtained results are applicable for further use in the implementation of tasks to optimize the work plan for marine seismic surveys with several vessels, both when planning seismic surveys and when adjusting plans directly on the ship. The use is also justified if it is necessary to re-enter the profile (for example, when re-working out a defective work area).

Keywords: marine seismic survey, seismic survey planning, transition zone, optimal planning, artificial intelligence, optimization algorithms, Dubins path, Traveling Salesman Problem.

Funding

The work was carried out within the framework of the Program for the creation and development of the Competence Center of the National Technological Initiative on the basis of the Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) in the area of "Artificial Intelligence", Contract No. 13/1251/2019 dated September 11, 2019, topic: "Creation of a software and hardware complex with an integrated expert system for operational planning of geological exploration processes of remote objects in real time".

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Baldacci R., Hadjiconstantinou E., Mingozzi A., An Exact Algorithm for the Traveling Salesman Problem with Deliveries and Collections, *Networks*, 2003, no. 42, pp. 26-41. DOI: 10.1002/net.10079
- Caillaud J.B., Maslovskaya S., Mensch T., Moulinier T., Zermelo-Markov-Dubins problem and extensions in marine navigation, *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, 2019, pp. 517-522.
- Dokht R., Hamidreza R., Talebi M., Optimizing 3-D seismic survey design parameters using genetic algorithm – a case study in southwest of Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, no. 6, pp. 1965-1975.
- Dubins L.E., On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents, *American Journal of Mathematics*, 1957, vol. 79, no. 3, pp. 497-516. <https://doi.org/10.2307/2372560>
- Gutin G., Jakubowicz H., Ronen S., Zverovitch A., Seismic vessel problem, *Communications in DQM*, 2003, vol. 8, 9 p.
- Lugo-Cárdenas I., Flores G., Salaza S., Lozano R., Dubins path generation for a fixed wing UAV, *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014, pp. 339-346.
- Markov A.V., Siman'kov V.I., Methodology for calculating the flight trajectories of unmanned aerial vehicles for monitoring the terrain, *Doklady BGUIR* (BSUIR reports), 2019, no. 4 (122), pp. 57-63. [In Russian].
- Saunders J., Brandon C., Curtis A., Beard R., McLain T., Static and Dynamic Obstacle Avoidance in Miniature Air Vehicles., *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, 2005, no. 1526, 14 p. DOI: 10.2514/6.2005-6950.
- Vermeer G., Acquisition/Processing - 3D seismic survey design optimization, *The Leading Edge*, 2003, vol. 22, no. 10, 9 p.
- Zaycev S.V., Tikhotskii S.A., Silaev S.V., Anan'ev A.A., Orlov R.V., Uzhegov D.V., Kudryashev I.Yu., Vasekin B.V., Kondrashenko S.I., Bazilevich S.O., Application of Artificial Intelligence Algorithms to Optimal Planning of Offshore Seismic Works, *Doklady Earth Sciences*, 2021a, vol. 501, pp. 1074-1080.
- Zaycev S.V., Vasekin B.V., Filippov D.D., Erofeev A.A., Tihockij S.A., An expert system to support operational decision making in offshore seismic surveys, *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2021666605*. vydano 18.10.2021b. [In Russian].

About the authors

ZAITSEV Sergey Vladimirovich – senior engineer, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; project manager, LLC “Center for engineering and technology of MIPT”. Nauchny per., 4, Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia. Ph.: +7(925) 422-77-16. E-mail: zay.ser.vl@gmail.com

TIKHOTSKY Sergey Andreevich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Corresponding Member of RAS, director, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia; chief researcher, head of laboratory, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia. Ph.: +7(926) 538-30-31. E-mail: sat@ifz.ru

SILAEV Aleksandr Vladimirovich – senior engineer, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; senior engineer, LLC “Center for engineering and technology of MIPT”. Nauchny per., 4, Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia. Ph.: +7(927) 055-85-79. E-mail: Silaev.av@cet-mipt.ru

ANANIEV Andrey Andreevich – postgraduate student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia. Ph.: +7(967) 241-51-69. E-mail: andrey.ananov@phystech.edu

UZHEGOV Denis Valer'evich – postgraduate student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia. Ph.: +7(916) 745-75-51. E-mail: Denis.uzhegov@phystech.edu

KUDRYASHOV Ivan Yur'evich – Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior engineer, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; senior engineer, LLC “Center for engineering and technology of MIPT”. Nauchny per., 4, Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia. Ph.: +7(926) 218-96-70. E-mail: kudryashov.iy@cet-mipt.ru

VASEKIN Boris Vasil'evich – Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior engineer, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; head of department, LLC “Center for engineering and technology of MIPT”. Nauchny per., 4, Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia. Ph.: +7(915) 307-17-72. E-mail: Vasekin.bv@cet-mipt.ru

KONDRASHENKO Stanislav Igorevich – Cand. Sci. (Eng.), head of the laboratory, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; head of the department, LLC “Center for engineering and technology of MIPT”. Nauchny per., 4, Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia. Ph.: +7(916) 070-16-64. E-mail: kondrashenko.si@cet-mipt.ru

KHLYUPIN Aleksey Nikolaevich – Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior lector, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia. Ph.: +7(964) 521-32-64. E-mail: khlyupin@phystech.edu;

KULYGIN Dmitriy Aleksandrovich – master, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; engineer, LLC “Center for engineering and technology of MIPT”. Nauchny per., 4, Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia. Ph.: +7(985) 630-75-63. E-mail: kulygin.da@cet-mipt.ru

BAZILEVICH Sergey Olegovich – head of the Marine Seismic Survey Department, JSC “MAGE”. Osenaya str., 11, Krylatsky 2 business Center, Moscow, 121609, Russia. Ph.: +7(925) 004-02-25. E-mail: sergey.bazilevich@mage.ru