

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-391-402

ALGORITHM FOR CONSTRUCTING AN ARBITRARY ROUTE ON A DISCRETE PLANE AND ITS EXECUTABLE DESCRIPTION

A. L. Kuznetsov, V. Yu. Gryzlov, Uami Abdeljalil

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — JSC “Petersburg Oil Terminal”, St. Petersburg, Russian Federation

Nowadays, modeling, in particular simulation, is becoming one of the most common methods of analysis and design in the field of transport. A large number of tasks in this area are related to the construction and study of the characteristics of routes on a plane. The use of computers as a tool for this first and foremost requires the creation of adequate and efficient ways to represent these routes in waters and territories in a computing environment. The classic representation of this kind is discrete space, in which each element of the physical surface is one-to-one mapped to the element in the computer memory. As a result, a rectangular array of data is correlated with the real physical space, each element of which contains certain properties of the original object selected for modeling, the composition of which is determined by the specifics of the task. This method of representation is considered to be the most efficient from a computational point of view. At the same time, it has a significant drawback, which is explained by the different nature of the properties of the original object and its computer model, namely, the continuity and discreteness of the basic representations. Any curves and even straight lines that are not orthogonal to the coordinate system are depicted in the form of stepped fragments, which can sometimes lead to the loss of the most basic characteristics. The most obvious example is the difference in these representations of distances, or proximity metrics: Euclidean and Manhattan. In addition, the digitization of curvilinear objects, understood as their transfer from a continuous geometric plane to a discrete space, is a complex and ambiguously solvable task. An efficient and objective algorithm used to solve this problem is described in the paper.

Keywords: transport, routes, discrete space, simulation modeling, container and raw materials transportation, optimization criteria, service organization schemes.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Vladimir Yu. Gryzlov, and Uami Abdeljalil. “Algorithm for constructing an arbitrary route on a discrete plane and its executable description.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 391–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-391-402.

УДК 656.614.3

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО МАРШРУТА НА ДИСКРЕТНОЙ ПЛОСКОСТИ И ЕГО ПОКООРИНАТНОЕ ОПИСАНИЕ

А. Л. Кузнецов, В. Ю. Грызлов, Уами Абделжалли

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — АО «Петербургский нефтяной терминал», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является имитационное моделирование, которое в настоящее время является одним из наиболее распространенных методов анализа и проектирования в сфере транспорта. Большинство задач в этой области связано с построением и исследованием характеристик маршрутов на плоскости. Отмечается, что использование компьютеров в качестве инструмента для этого в первую очередь требует создания адекватных и эффективных способов представления этих маршрутов на акваториях и территориях в вычислительной среде. Классическим представлением подобного рода является дискретное пространство, в котором каждому элементу физической поверхности взаимно-однозначно сопоставлен элемент в памяти компьютера. Как следствие, реальному физическому пространству ставится в соответствие прямоугольный массив данных, каждый элемент которого содержит те или иные выбранные для моделирования свойства исходного объекта. Состав массива данных определяется спецификой задачи.

Такой способ представления, являющийся наиболее эффективным с вычислительной точки зрения, имеет в то же время значительный недостаток, объясняемый различной природой свойств исходного объекта и его компьютерной модели, а именно непрерывности и дискретности базовых представлений. При его использовании любые кривые и даже прямые линии, не ортогональные системе координат, изображаются в виде ступенчатых фрагментов, что иногда может приводить к потере основных характеристик. Отмечается, что оцифровка криволинейных объектов, понимаемая как их перенесение с непрерывной геометрической плоскости в дискретное пространство, является сложной и неоднозначно решаемой задачей. В настоящей статье описывается эффективный и объективный алгоритм, используемый для решения этой задачи.

Ключевые слова: транспорт, судоходные маршруты, дискретное пространство, имитационное моделирование, контейнерные и сырьевые перевозки, критерии оптимизации, схемы организации сервисов.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Алгоритм построения произвольного маршрута на дискретной плоскости и его по- координатное описание / А. Л. Кузнецов, В. Ю. Грызлов, Уами Абделжалил // Вестник Государствен- ного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 391–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-391-402.

Введение (Introduction)

Современные внешнеполитические процессы обусловили постепенное прекращение торгово-экономических отношений с рядом промышленно развитых стран и, соответственно, кардинальное снижение грузооборота с ранее стабильными зарубежными контрагентами. Так, для Балтийского бассейна в этом качестве традиционно выступали страны Западной Европы. Новые экономические условия обусловили потребность разработки в кратчайшие сроки новых маршрутов, причем как для контейнерных (транспорт общего пользования), так и для сырьевых (торгово-промышленное судоходство) перевозок. Таким образом, существует проблема оператив- ного проектирования оптимальных судоходных маршрутов, решение которой в настоящее время оказывается неочевидным. В работе [1] выполнено исследование задачи проектирования контей- нерных линий. Выполненный анализ наглядно демонстрирует следующие особенности организа- ции регулярных контейнерных перевозок:

- ограничения и критерии оптимизации;
- разновидности вариантов схем организации сервисов;

В качестве основных отмечены такие ограничения и критерии оптимизации, как ограниче- ние времени транзита, стоимость транспортировки, отклоненные потребности грузоотправите- лей, оптимизация скорости.

В исследовании [2] подробно рассмотрены разновидности вариантов схем организации ли- нейных сервисов, а именно: простого сервиса, сервиса «бабочка», сервиса «маятник», сложного сервиса. Также отмечается применяемый при несбалансированном контейнеропотоке усложнен- ный асимметричный вариант конфигурации указанных схем. Аналогичный подход, заключаю- щийся в использовании многоуровневого графа для моделирования сложных сервисов, также ис- пользовался ранее в исследованиях [3] и [4]. При этом следует отметить, что сложность подзадачи возрастает с увеличением количества уровней (слоев). Так, в исследовании [5] введено ограниче- ние в два уровня в определенном графе.

Общей целью во многих существующих моделях является минимизация расходов линей- ного контейнерного сервиса, достигаемая минимизацией пробегов судов. В общем виде задача маршрутизации судов сводится к задаче коммивояжера. Таким образом, за границами исследова- ния остаются как траектории, так и скорости движения судов, в том числе экономические, кото- рые имеют существенное значение при планировании рейсов. Кроме того, не рассмотрены необ- ходимые ротации зафрахтованных судов, связанные с их более выгодной бункеровкой, сменами экипажей и иными вспомогательными операциями. В целях устранения этих «лакун» в теории и практике, указанных в работах [6]–[9], в данном исследовании воспользуемся подходом, описан- ным в [10], предполагающим переход от непрерывного восприятия исследуемых (организуемых) графов к дискретному.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пусть на плоскости имеется некоторый отрезок прямой с начальной точкой (X_0, Y_0) и конечной точкой (X_1, Y_1) . На плоскости нанесена сетка, соответствующая целым значениям координат, как показано на рис. 1.

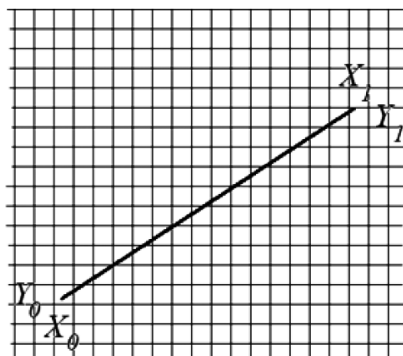


Рис. 1. Отрезок прямой на дискретной сетке
Fig. 1. Straight line segment on a discrete grid

При изображении линии не в векторной, а в растровой графике каждый квадрат сетки («дискрет»), через который проходит данный отрезок, представлен в виде единицы. С уменьшением масштаба ортогональные скачки линий делаются все менее заметными, приближая дискретное изображение к своему исходному непрерывному оригиналу (рис. 2).

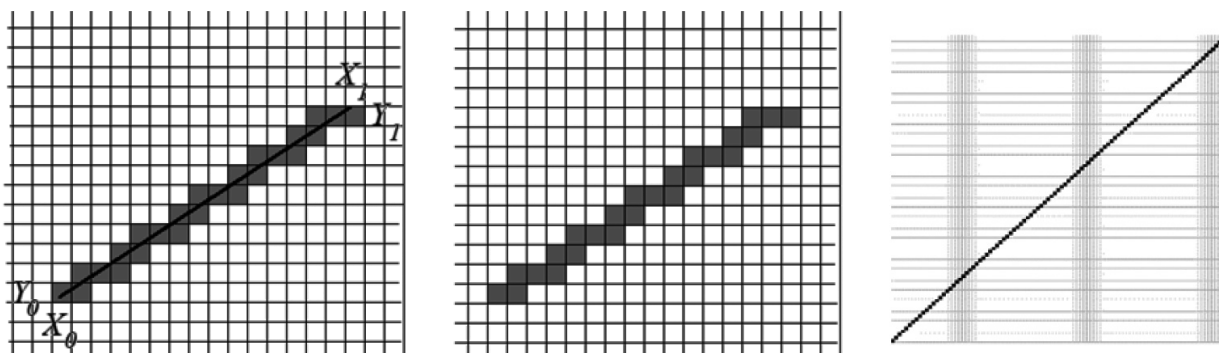


Рис. 2. Изображение отрезка линии в растровой графике
Fig. 3. Image of a line segment in raster graphics

Для человека с его глобальным зрительным восприятием изображения заполнение «задетых» дискретов сетки единицами не представляет труда. Компьютеру, с его «локальным» представлением, для решения этой задачи необходимо сформулировать определенный алгоритм.

Заметим, что в алгебраической форме рассматриваемая линия описывается уравнением $Y = Y(X) = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} (X - X_0) + Y_0$, где область определения функции есть отрезок (X_0, X_1) . С точки зрения организации вычислительного процесса этот вывод справедлив только для отрезка, приведенного на рис. 1. Если $X_0 > X_1$, то областью определения функции становится отрезок (X_1, X_0) . Это соответствует случаю, когда начальная точка отрезка прямой лежит правее его конечной точки. В общем случае областью определения рассматриваемой функции является отрезок $[\min(X_0, X_1), \max(X_0, X_1)]$ (см. [11]–[14]). Аналогично областью значений функции является интервал $[\min(Y_0, Y_1), \max(Y_0, Y_1)]$, определяемой направлением отрезка: вверх или вниз.

Сопоставим границы определенной таким образом области задания функции интервалу $[X_{\text{л}}, X_{\text{пр}}]$, а границы интервала значений функции в виде $[Y_{\text{в}}, Y_{\text{н}}]$. Очевидно, что весь отрезок прямой содержится в определенном таким образом прямоугольнике с координатами диагонали $(X_{\text{л}}, Y_{\text{н}})$ и $(X_{\text{п}}, Y_{\text{в}})$ — рис. 3, а.

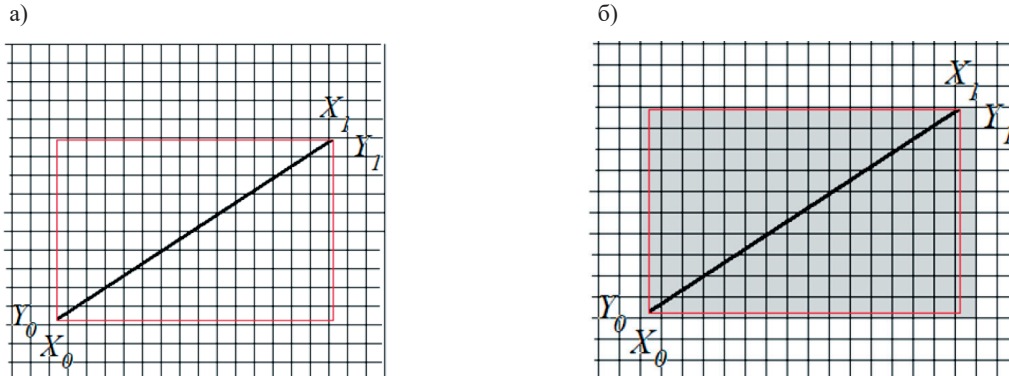


Рис. 3. Описывающие прямоугольники: а — of a vector function; б — дискретной функции
Fig. 3. Outlining rectangles: а — векторной функции; б — of a discrete function

Очевидно, что отрезок рассматриваемой векторной линии содержится в «расширенном» прямоугольнике, округляющем значения до целых, т. е. определяемых границами $(X_{\text{лев}}, Y_{\text{нижн}})$ и $(X_{\text{прав}} + 1, Y_{\text{нижн}} + 1)$. Здесь обозначена функция выделения целой части числа «антье». Это расширение показано на рис. 3, б.

Если произвольная точка на плоскости задается координатами (X, Y) , то она содержится в клетке сетки (прямоугольнике) с векторными координатами по горизонтали от X до $X+1$ и по вертикали от Y до $Y+1$.

Введем адресацию дискретов описывающего прямоугольника в виде пары целочисленных координат (x, y) , где $x = X$ и $y = Y$. Например, если взять точку $(X = 3,14, Y = 2,71)$, то соответствующий ей дискрет будет иметь координаты $(x = 3, y = 2)$, а диагональ соответствующего этому дискрету прямоугольника — «непрерывные» координаты нижнего левого угла $(X = 3, Y = 2)$ и верхнего правого угла $(X = 4, Y = 3)$.

Отрезок прямой с начальной (X_0, Y_0) и конечной (X_1, Y_1) точками будет заключен в описывающем дискретном прямоугольнике, приведенном на рис. 4, с определенными таким образом координатами нижнего левого угла (x_0, y_0) и верхнего правого угла (x_1, y_1) .

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник с координатами (x, y) , нижняя грань которого представляет собой горизонтальный отрезок, расположенный на высоте $Y = y$. Его верхней гранью является такой же отрезок, расположенный на высоте $Y = y + 1$. Аналогично его левая грань является вертикальным отрезком от Y до $Y + 1$, имеющим горизонтальную координату x , а правая грань — таким же вертикальным отрезком, но с координатой $x + 1$.

Рассмотрим верхнюю грань, представляющую собой отрезок от $X = x$ до $X = x + 1$ на высоте $y + 1$. Условием пересечения прямой $Y = F(X) = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(X - X_0) + Y_0$ с этим отрезком является то, что точка $X = F^{-1}(Y)$ лежит его пределах. Эта точка вычисляется через обратную функцию

$$X = F^{-1}(Y) = \frac{(Y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0.$$

Аналогичным условием пересечения для нижней грани будет нахождение внутри отрезка от $X = x$ до $X = x + 1$ точки $X = F^{-1}(Y) = \frac{(y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0$.

Рассмотрим теперь левую грань, представляющую собой вертикальный отрезок от $Y = y$ до $Y = y + 1$ с абсциссой x . Очевидно, что условием его пересечения с отрезком прямой

$Y = F(X) = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} X + Y_0$ является то, что значение $Y = F(x)$ находится в пределах этого отрезка.

Аналогичное условие пересечения для правой грани будет нахождение внутри отрезка от $Y = y$ значения $Y = F(x + 1)$.

Ранее изложенное является достаточно очевидными и формальными рассуждениями, но именно эта особенность позволяет построить алгоритм для решения поставленной задачи: найти изображение каждого дискрета на двоичной плоскости $D(x, y)$ в виде «1» или «0». Пример построения изображения элементарного отрезка с помощью данного алгоритма приведен на рис. 4.

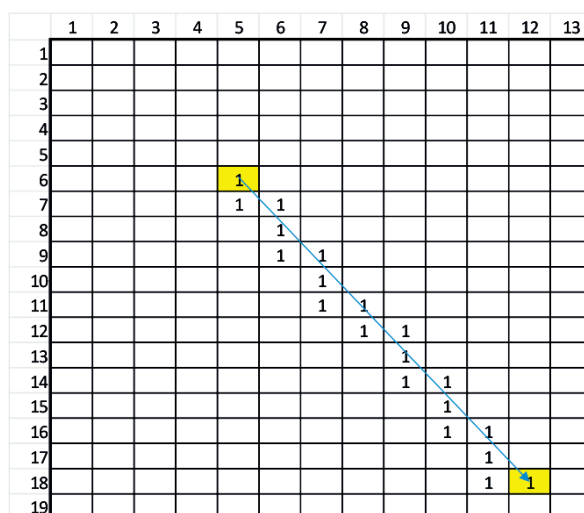


Рис. 4. Пример работы алгоритма отображения для элементарного отрезка
Fig. 4. An example of the mapping algorithm operation for an elementary segment

Из этого рисунка видно, что формально построенное растровое изображение значительно отличается от исходного векторного.

Обсуждение (Discussion)

Алгоритм построения маршрута имеет конечной целью не просто получение отображения непрерывной ломаной кривой на дискретной плоскости, а построение упорядоченной последовательности координат, изображающей перемещение рабочей точки из начала в конец соответствующего пути. С этой целью полученные ранее алгебраические и геометрические соотношения должны быть переведены в наиболее подходящие вычислительные процедуры, исходными данными для которых служат не массивы заполненных в дискретном пространстве ячеек, а сама последовательность их заполнения. По этой причине движение вдоль элементарного отрезка прямой линии $(X_0, Y_0):(X_1, Y_1)$ различается в зависимости от того, в какой квадрант от начала происходит перемещение (рис. 5).

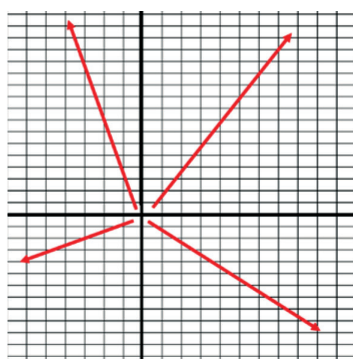


Рис. 5. Направление движения по отрезку
Fig. 5. Direction of movement along the segment

Как следствие, при реализации алгоритма необходимо рассмотреть следующие четыре отдельных случая.

Первый квадрант ($X_0 < X_1$, $Y_0 < Y_1$).

Уравнение прямой линии $Y = F(X)$ в первом квадранте

$$Y = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(X - X_0) + Y_0.$$

Уравнение обратной функции $X = F^{-1}(Y)$

$$X = \frac{(Y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0.$$

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник, с координатами (x, y) , нижняя грань которого представляет собой открытый слева горизонтальный отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y - 1$. Его верхней гранью является отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y$, левой гранью — вертикальный отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x - 1$, правой гранью — отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с нижней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах этого отрезка, или $x - 1 < \frac{(y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с верхней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах отрезка, или $x - 1 < \frac{(y + 1 - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с левой гранью является то, что точка $Y = F(x)$ лежит в пределах отрезка, или $y - 1 < \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(x - X_0) + Y_0 \leq y$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с правой гранью является то, что точка $Y = F(x + 1)$ лежит в пределах отрезка, или $y - 1 < \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(x + 1 - X_0) + Y_0 \leq y$.

Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения левой и правой грани служит $y - 1 < Y_0 \leq y$.

Если линия вертикальна, то условием пересечения верхней и нижней грани служит неравенство $x - 1 < X_0 \leq x$.

Второй квадрант ($X_0 > X_1$, $Y_0 < Y_1$).

Уравнение прямой линии $Y = F(X)$ во втором квадранте

$$Y = \frac{Y_1 - Y_0}{X_0 - X_1}(X_0 - X) + Y_0.$$

Уравнение обратной функции $X = F^{-1}(Y)$

$$X = X_0 - \frac{(Y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_0 - X_1).$$

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник, с координатами (x, y) . Его нижняя грань представляет собой открытый с левого конца горизонтальный отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y - 1$. Его верхней частью является отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y$. Его левая грань есть вертикальный отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x - 1$, а правая часть — отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с нижней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах этого отрезка, или $x-1 < \frac{(y-Y_0)}{(Y_1-Y_0)}(X_1-X_0)+X_0 \leq x$. Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с верхней гранью является точка $X = F^{-1}(y)$, которая лежит в пределах отрезка, или $x-1 < \frac{(y+1-Y_0)}{(Y_1-Y_0)}(X_1-X_0)+X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с левой гранью является то, что точка $Y = F(x)$ лежит в пределах отрезка, или $y-1 < \frac{Y_1-Y_0}{X_1-X_0}(E-X_0)+Y_0 \leq y$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с правой гранью является то, что точка $Y = F(x+1)$ лежит в пределах отрезка, или $y-1 < \frac{Y_1-Y_0}{X_1-X_0}(E+1-X_0)+Y_0 \leq y$.

Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения левой и правой грани служит $y-1 < Y_0 \leq y$. Если линия вертикальна, то условием пересечения верхней и нижней грани служит неравенство $x-1 < X_0 \leq x$.

Третий квадрант ($X_0 > X_1$, $Y_0 > Y_1$).

Уравнение прямой линии $Y = F(X)$ в третьем квадранте

$$Y = -\frac{Y_0-Y_1}{X_0-X_1}(X_0-X)+Y_0.$$

Уравнение обратной функции $X = F^{-1}(Y)$

$$X = \frac{(Y-Y_0)}{(Y_0-Y_1)}(X_0-X_1)+X_0.$$

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник, с координатами (x, y) , верхняя грань которого представляет собой открытый с левого конца горизонтальный отрезок $[X = x-1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y-1$. Его нижняя грань есть отрезок $[X = x-1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y$, левая грань — вертикальный отрезок $[Y = y; Y = y-1]$, имеющий абсциссу $X = x-1$, правая грань — отрезок $[Y = y-1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с нижней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах этого отрезка, или $x-1 < \frac{(y-Y_0)}{(Y_0-Y_1)}(X_1-X_0)+X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с верхней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах отрезка, или $x-1 < \frac{(y+1-Y_0)}{(Y_1-Y_0)}(X_1-X_0)+X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с левой гранью является то, что точка $Y = F(x)$ лежит в пределах отрезка, или $y-1 < \frac{Y_1-Y_0}{X_1-X_0}(E-X_0)+Y_0 \leq y$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с правой гранью является то, что точка $Y = F(x+1)$ лежит в пределах отрезка, или $y-1 < \frac{Y_1-Y_0}{X_1-X_0}(E+1-X_0)+Y_0 \leq y$.

Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения левой и правой грани служит $y-1 < Y_0 \leq y$.

Если линия вертикальна, то условием пересечения верхней и нижней грани служит неравенство $x-1 < X_0 \leq x$.

Четвертый квадрант ($X_0 < X_1, Y_0 > Y_1$).

Уравнение прямой линии $Y = F(X)$ в первом квадранте

$$Y = \frac{Y_0 - Y_1}{X_1 - X_0}(X - X_0) + Y_0$$

Уравнение обратной функции $X = F^{-1}(Y)$

$$X = \frac{(Y - Y_0)}{(Y_0 - Y_1)}(X_1 - X_0) + X_0.$$

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник, с координатами (x, y) . Его верхняя грань представляет собой открытый с левого конца горизонтальный отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y - 1$, нижняя грань есть отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y$, левая грань — вертикальный отрезок $[Y = y; Y = y - 1]$, имеющий абсциссу $X = x - 1$, правая грань — отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с нижней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах этого отрезка, или $x - 1 < \frac{(y - Y_0)}{(Y_0 - Y_1)}(X_1 - X_0) + X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с верхней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах отрезка, или $x - 1 < \frac{(y + 1 - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с левой гранью является то, что точка $Y = F(x)$ лежит в пределах отрезка, или $y - 1 < \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(x - X_0) + Y_0 \leq y$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с правой гранью является то, что точка $Y = F(x + 1)$ лежит в пределах отрезка, или $y - 1 < \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(x + 1 - X_0) + Y_0 \leq y$.

Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения левой и правой грани служит $y - 1 < Y_0 \leq y$.

Если линия вертикальна, то условием пересечения верхней и нижней грани служит неравенство $x - 1 < X_0 \leq x$.

Результаты (Results)

Рассмотрим некоторый возможный обобщенный маршрут, соединяющий вершины $A-C-D-B-A$ (рис. 6), конкретная топографическая конфигурация которого представлена на рис. 7, и описание которого приведено на рис. 8.

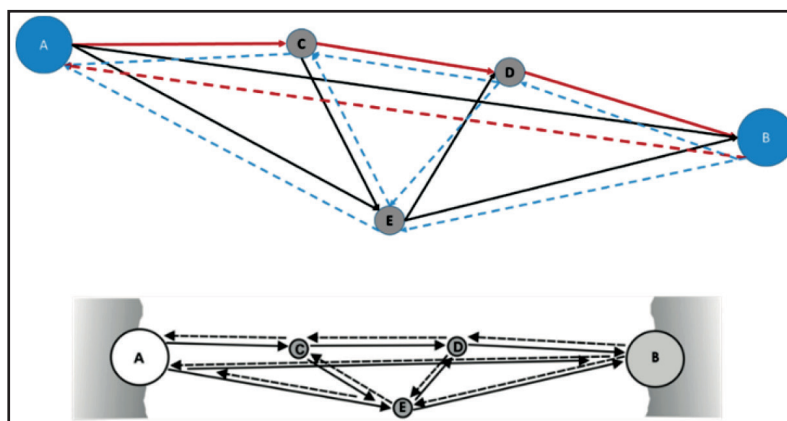


Рис. 6. Обобщенный граф возможных маршрутов
Fig. 6. Generalized graph of possible routes

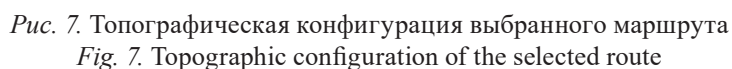


Рис. 8. Описание конфигурации кругового маршрута
Fig. 8. Description of the circular route configuration

Рис. 9. Экранная форма алгоритма построения произвольного маршрута
Fig. 9. Screen form of the algorithm for constructing an arbitrary route

Репро																																																																																																																																																																						
Нач	Кон																																																																																																																																																																					
A	C	у	1																																																																																																																																																																			
		х	16	17	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28	28	29	29	30	31	31	32	33	33	34	34	35	35	36	36	37	37	38	38	39	39	40	40	41	41	42	42	43	43	44	44	45	45	46	46	47	47	48	48	49	49	50	50	51	51	52	52	53	53	54	54	55	55	56	56	57	57	58	58	59	59	60	60	61	61	62	62	63	63	64	64	65	65	66	66	67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75	76	76	77	77	78	78	79	79	80	80	81	81	82	82	83	83	84	84	85	85	86	86	87	87	88	88	89	89	90	90	91	91	92	92	93	93	94	94	95	95	96	96	97	97	98	98	99	99	100	100
		1	16	17	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28	28	29	29	30	31	31	32	33	33	34	34	35	35	36	36	37	37	38	38	39	39	40	40	41	41	42	42	43	43	44	44	45	45	46	46	47	47	48	48	49	49	50	50	51	51	52	52	53	53	54	54	55	55	56	56	57	57	58	58	59	59	60	60	61	61	62	62	63	63	64	64	65	65	66	66	67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75	76	76	77	77	78	78	79	79	80	80	81	81	82	82	83	83	84	84	85	85	86	86	87	87	88	88	89	89	90	90	91	91	92	92	93	93	94	94	95	95	96	96	97	97	98	98	99	99	100	100
1	16	17	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28	28	29	29	30	31	31	32	33	33	34	34	35	35	36	36	37	37	38	38	39	39	40	40	41	41	42	42	43	43	44	44	45	45	46	46	47	47	48	48	49	49	50	50	51	51	52	52	53	53	54	54	55	55	56	56	57	57	58	58	59	59	60	60	61	61	62	62	63	63	64	64	65	65	66	66	67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75	76	76	77	77	78	78	79	79	80	80	81	81	82	82	83	83	84	84	85	85	86	86	87	87	88	88	89	89	90	90	91	91	92	92	93	93	94	94	95	95	96	96	97	97	98	98	99	99	100	100		
C	D	у	9	10	10	11	11	12	13	13	14	15	15	16	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	30	31	31	32	33	33	34	35	35	36	36	37	37	38	38	39	39	40	40	41	41	42	42	43	43	44	44	45	45	46	46	47	47	48	48	49	49	50	50																																																																																													

Рис. 10. Покоординатное описание движения по маршруту (фрагмент)
Fig. 10. Coordinate-by-coordinate description of movement along the route (fragment)

Следует особо отметить, что основной целью описываемого алгоритма является покоординатное описание передвижения по маршруту, используемое в различных методах визуализации и моделирования.

Заключение (Conclusion)

Задача построения дискретной модели непрерывного геометрического маршрута возникает во многих транспортных задачах. Противоречие между непрерывностью и дискретностью представлений оригинала и модели делает эту задачу сложной и неоднозначной, что зачастую приводит к утрате необходимых для отражения важных свойств моделируемого маршрута, включая метрики расстояния.

В данном исследовании представлен рациональный способ перехода от векторного представления к дискретному, который находится в основе растровой графики. Формализация правил перехода позволяет получать однозначное и равномерное представление, необходимое для исключения возможной неоднозначности представления графики. Полученное с помощью алгоритма покоординатное описание передвижения по маршруту может быть использовано в различных методах визуализации и моделирования. Предполагается, что указанный подход позволит оперативно проектировать новые судоходные маршруты в условиях происходящего в нашей стране переориентирования рынков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин А. В. Задача проектирования контейнерной линии в современной транспортной системе России / А. В. Галин, П. С. Рудный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 64–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.
2. Christiansen M. Liner shipping network design / M. Christiansen, E. Hellsten, D. Pisinger, D. Sacramento, C. Vilhelmsen // European Journal of Operational Research. — 2020. — Vol. 286. — Is. 1. — Pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.057.
3. Guericke S. Liner shipping cargo allocation with service levels and speed optimization / S. Guericke, K. Tierney // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2015. — Vol. 84. — Pp. 40–60. DOI: 10.1016/j.tre.2015.10.002.
4. Bellman R. On a routing problem / R. Bellman // Quarterly of Applied Mathematics. — 1958. — Vol. 16. — Is. 1. — Pp. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.
5. Thun K. Analyzing complex service structures in liner shipping network design / K. Thun, H. Andersson, M. Christiansen // Flexible Services and Manufacturing Journal. — 2017. — Vol. 29. — Pp. 535–552. DOI: 10.1007/s10696-016-9262-6.
6. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik / E. W. Dijkstra. — 1959. — Vol. 1. — Pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
7. Евстигнеев В. А. Итеративные алгоритмы глобального анализа графов. Пути и покрытия / В. А. Евстигнеев; под ред. А. П. Ершова. — М.: Наука, 1985. — 352 с.
8. Chen D. Z. Developing algorithms and software for geometric path planning problems / D. Z. Chen // ACM Computing Surveys (CSUR). — 1996. — Vol. 28. — Is. 4es. — Pp. 18-es. DOI: 10.1145/242224.242246.
9. Галкина В. А. Построение кратчайших путей в ориентированном графе // Дискретная математика. Комбинаторная оптимизация на графах / В. А. Галкина. — М.: Издательство «Гелиос АРВ», 2003. — 232 с.
10. Кузнецов А. Л. Матричный метод поиска путей на взвешенных ориентированных графах в задачах сетевого планирования при проектировании и эксплуатации морских портов / А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.
11. Kröger M. Shortest multiple disconnected path for the analysis of entanglements in two-and three-dimensional polymeric systems / M. Kröger // Computer physics communications. — 2005. — Vol. 168. — Is. 3. — Pp. 209–232. DOI: 10.1016/j.cpc.2005.01.020.
12. Алексеев В. Е. Глава 3.4. Нахождения кратчайших путей в графе / В. Е. Алексеев, В. А. Таланов // Графы. Модели вычислений. Структуры данных. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. университета, 2005. — С. 236–237.

13. Abraham I. Highway dimension, shortest paths, and provably efficient algorithms / I. Abraham, A. Fiat, A. V. Goldberg, R. F. Werneck // *Proceedings of the twenty-first annual ACM-SIAM symposium on Discrete Algorithms*. — Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. — Pp. 782–793. DOI: 10.1137/1.9781611973075.6.

14. Lee C. Y. An algorithm for path connections and its applications / C. Y. Lee // *IRE transactions on electronic computers*. — 1961. — № 3. — Pp. 346–365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222.

REFERENCES

1. Galin, Aleksandr V., and Pavel S. Rudny. “Liner shipping network design problem in modern transportation system of Russia.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 64–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.

2. Christiansen, Marielle, Erik Hellsten, David Pisinger, David Sacramento, and Charlotte Vilhelmsen. “Liner shipping network design.” *European Journal of Operational Research* 286.1 (2020): 1–20. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.057.

3. Guericke, Stefan, and Kevin Tierney. “Liner shipping cargo allocation with service levels and speed optimization.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 84 (2015): 40–60. DOI: 10.1016/j.tre.2015.10.002.

4. Bellman, Richard. “On a routing problem.” *Quarterly of applied mathematics* 16.1 (1958): 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.

5. Thun, Kristian, Henrik Andersson, and Marielle Christiansen. “Analyzing complex service structures in liner shipping network design.” *Flexible Services and Manufacturing Journal* 29 (2017): 535–552. DOI: 10.1007/s10696-016-9262-6.

6. Dijkstra, E.W. “A note on two problems in connexion with graphs.” *Numerische Mathematik* 1 (1959): 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.

7. Evstigneev, V. A. *Iterativnye algoritmy global'nogo analiza grafov. Puti i pokrytiya*. Edited by A. P. Ershov. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1985.

8. Chen, Danny Z. “Developing algorithms and software for geometric path planning problems.” *ACM Computing Surveys (CSUR)* 28.4es (1996): 18-es. DOI: 10.1145/242224.242246.

9. Galkina, V. A. *Postroenie kratchaishikh putei v orientirovannom grafe // Diskretnaya matematika. Kombinatornaya optimizatsiya na grafakh*. M.: Izdatel'stvo “Gelios ARV”, 2003.

10. Kuznetsov, Aleksandr L. “Matrix method for finding the paths on weighted oriented graphs in the tasks of port net operational planning.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.

11. Kröger, Martin. “Shortest multiple disconnected path for the analysis of entanglements in two- and three-dimensional polymeric systems.” *Computer physics communications* 168.3 (2005): 209–232. DOI: 10.1016/j.cpc.2005.01.020.

12. Alekseev, V.E., and V. A. Talanov. “Glava 3.4. Nakhozhdeniya kratchaishikh putei v grafe.” *Grafy. Modeli vychislenii. Struktury dannykh*. Nizhnii Novgorod: Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gos. universiteta, 2005. 236–237.

13. Abraham, Ittai, Amos Fiat, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. “Highway dimension, shortest paths, and provably efficient algorithms.” *Proceedings of the twenty-first annual ACM-SIAM symposium on Discrete Algorithms*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. 782–793. DOI: 10.1137/1.9781611973075.6.

14. Lee, Chin Yang. “An algorithm for path connections and its applications.” *IRE transactions on electronic computers* 3 (1961): 346–365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Грызлов Владимир Юрьевич —
генеральный директор
АО «Петербургский нефтяной терминал»
198096, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Элеваторная площадка, д. 32
e-mail: office@pnt.spb.ru
Уами Абделжалил — аспирант
Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Gryzlov, Vladimir Yu. —
CEO
JSC “Petersburg Oil Terminal”
32 Elevatornaya Ploshadka, St. Petersburg, 198096,
Russian Federation
e-mail: office@pnt.spb.ru
Uami, Abdeljalil — Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov, Aleksandr L.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 6 мая 2024 г.
Received: May 6, 2024.*