

Алгоритм решения задачи оптимального трассирования лесовозной автомобильной дороги на неоднородной местности

Елена В. Чернышова¹ elenabok@mail.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. Трассирование отдельных лесовозных автомобильных дорог является частью более общей задачи – разработки схемы транспортного освоения лесосырьевой базы предприятия. В результате ее решения определяется размещение основных транспортных путей – магистралей и веток – в лесном массиве с учетом оптимальных расстояний между ветками. При установлении этих расстояний учитываются затраты на лесохозяйственные мероприятия, отнесенные на суммарный объем древесины, тяготеющий к ветке. Поиск близкого к оптимальному по одному из критериев варианта трассы лесовозной автомобильной дороги для вывозки сосредоточенного объема древесины осуществляется в несколько этапов. Сначала определяется оптимальный вариант трассы, вписанный в сетку квадратов цифровой модели местности (трасса проходит по сторонам и диагоналям квадратов). Затем найденный вариант сглаживается ломаными линиями, расположенными в его окрестности. Для каждого из сглаженных вариантов трассы автоматически рассчитываются четырнадцать важнейших технико-экономических показателей, позволяющих принять обоснованное решение при выборе окончательного варианта трассы будущей дороги. Точность построения цифровой модели рельефа по топографической карте с помощью разработанной методике оценивалась по эталонным продольным профилям, снятым вручную с карты в горизонталях и построенным автоматически с использованием цифровой модели местности. Результаты сравнительного анализа свидетельствуют о вполне удовлетворительной точности разработанной методики ручного оцифровывания карт. С помощью тех же эталонных продольных профилей можно контролировать правильность результатов оцифровывания. Для этого достаточно провести несколько прямолинейных отрезков, пересекающих в различных направлениях моделируемый участок, и сравнить их продольные профили, построенные по карте, с автоматически рассчитанными.

Ключевые слова: лесовозные автомобильные дороги, проектирование, трассирование

Algorithm for solving the problem of optimal tracing of a timber road on a non-uniform terrain

Elena V. Chernyshova¹ elenabok@mail.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Summary. The tracing of individual logging roads is part of a more general task - the development of a scheme for transport development of the enterprise's forest raw material base. As a result of its solution, the location of the main transport routes - highways and branches - is determined in the forest, taking into account the optimal distances between the branches. When establishing these distances, account is taken of the costs of forest management measures, referred to the total volume of timber, tending to the branch. The search for a variant of the track of a timber logging road close to the optimal for one of the criteria for the removal of the concentrated volume of timber is carried out in several stages. First, the optimal route variant is inscribed, inscribed in the grid of squares of the digital terrain model (the route passes along the sides and diagonals of squares). Then the found variant is smoothed with broken lines located in its vicinity. For each of the smoothed variants of the route, fourteen important technical and economic indicators are automatically calculated, allowing to make an informed decision when choosing the final version of the route of the future road. The accuracy of the construction of the digital relief model on a topographic map using the developed technique was estimated from the reference longitudinal profiles taken manually from the map in contours and built automatically using a digital terrain model. The results of the comparative analysis testify to the quite satisfactory accuracy of the developed method of manual digitization of maps. With the help of the same reference longitudinal profiles, it is possible to control the correctness of the results of digitization. To do this, it is sufficient to draw several rectilinear segments intersecting the simulated section in different directions and compare their longitudinal profiles constructed on the map with automatically calculated.

Keywords: forest roads, design, tracing

Введение

Будем рассматривать сетку цифровой модели местности (ЦММ), описывающую некоторый прямоугольный участок местности, в виде сильного связанного графа G , вершинами которого являются вершины квадратов сетки, а ребрами – стороны и диагонали этих квадратов [1, 2].

Пронумеровав вершины прямоугольной сетки матричным способом («строки» от 1 до N , «столбцы» от 1 до M), свяжем с графом G прямоугольную систему координат. Вершина, стоящая в i -й «строке» и j -м «столбце» будем

иметь координаты (i и j) и обозначаться V_{ij} . Дугу, ведущую из вершины V_{ij} и $V_{i'j'}$, обозначим через $U_{ij}^{i'j'}$. Каждой дуге $U_{ij}^{i'j'}$ графа G поставлено в соответствие неотрицательное число $\tilde{n}_{ij}^{i'j'} = c(U_{ij}^{i'j'})$, именуемое ценой дуги. Связь цены дуги с введенными выше ценами областей и линейных участков неоднородности раскрывается ниже в этом же разделе диссертации. Каждое ребро состоит из двух противоположно направленных дуг $U_{ij}^{i'j'}$ и $U_{i'j'}^{ij}$ (рисунок 1).

Для цитирования

Чернышова Е.В. Алгоритм решения задачи оптимального трассирования лесовозной автомобильной дороги на неоднородной местности // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 2. С. 113–120. doi:10.20914/2310-1202-2017-2-113-120

For citation

Chernyshova F.S. Algorithm for solving the problem of optimal tracing of a timber road on a non-uniform terrain. *Vestnik VGUI* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 2. pp. 113–120. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-2-113-120

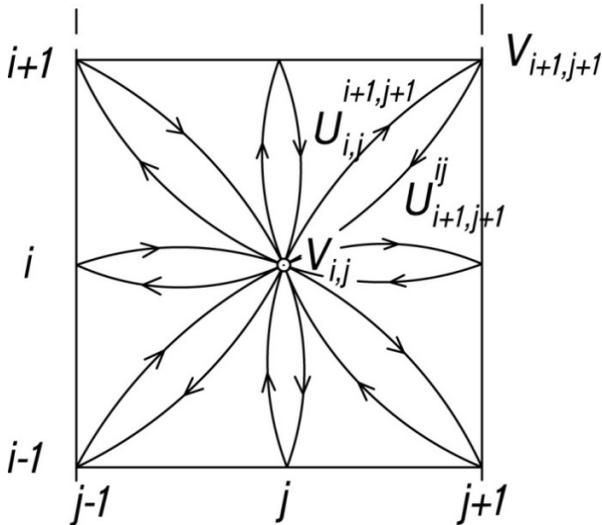


Рисунок 1. Локальная структура сетки ЦММ (графа G) в окрестности узла V_{ij}

Figure 1. The local structure of the DTM grid (graph G) in the neighborhood of the node V_{ij}

Путем $\mu_{i_0j_0}^{i_kj_k}$ из вершины $V_{i_0j_0}$ в вершину $V_{i_kj_k}$ будем называть упорядоченную последовательность дуг, у которых начало последующей совпадает с концом предыдущей: $\mu_{i_0j_0}^{i_kj_k} = \{ U_{i_0j_0}^{i_1j_1}, U_{i_1j_1}^{i_2j_2}, \dots, U_{i_{k-2}j_{k-2}}^{i_{k-1}j_{k-1}}, U_{i_{k-1}j_{k-1}}^{i_kj_k} \}$.

Определим цену пути как сумму цен входящих в него дуг. Классическая задача о кратчайшем пути между двумя вершинами $V_{i_0j_0}$ и $V_{i_kj_k}$ эквивалентна в наших обозначениях задаче поиска пути $\mu_{i_0j_0}^{i_kj_k}$, имеющего минимальную цену.

Одна из эффективных модификаций метода решения этой задачи состоит в следующем [3]:

1. Вершине $V_{i_0j_0}$ приписывается значение $\hat{A}_{i_0j_0} = 0$, остальным вершинам графа $A_{ij} = +\infty$.
2. Просматриваются вершины графа, причем, если найдется такая вершина V_{ij} и ведущая в нее дуга $U_{i'j'}^{ij}$, что $A_{ij} > A_{i'j'} + \tilde{n}_{i'j'}^{ij}$, то этой вершине приписывается новое (меньшее) значение $A_{ij} = A_{i'j'} + \tilde{n}_{i'j'}^{ij}$.

3. После того, как все A_{ij} стабилизируется, восстанавливается оптимальный путь μ^* , начиная с его конца – вершины $V_{i_kj_k}$. Из п. 2 следует, что найдется такая дуга $U_{ij}^{i_kj_k}$, что $\hat{A}_{i_kj_k} = A_{ij} + \tilde{n}_{ij}^{i_kj_k}$. По вершине V_{ij} определяется вершина $U_{i'j'}$ такая, что $A_{ij} = A_{i'j'} + \tilde{n}_{i'j'}^{ij}$, и так далее до начальной вершины пути $V_{i_0j_0}$.

Строгая положительность цен $\tilde{n}_{i'j'}^{ij}$ гарантирует сходимость итерационного процесса и отсутствие замкнутых циклов.

Массивы относительных высот H и значений критерия A вершинах графа G , будем записывать в виде двух матриц из N строк и M столбцов (рисунок 2). Будем также различать грузовое и не грузовое (порожнее) направления движения по трассируемому отрезку лесовозной автомобильной дороги: если в пункт, соответствующий начальной точке $V_{i_0j_0}$ искомого пути на графе G , лесоматериалы ввозятся, то будем говорить, что «задано грузовое направление», если же вывозится, то – «задано не грузовое направление».

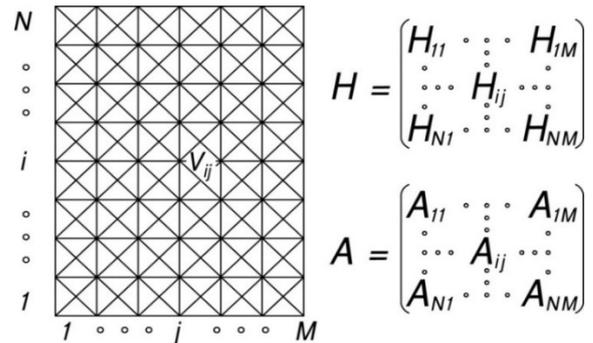


Рисунок 2. Цифровая модель местности и соответствующие ей матрицы относительных высот H и критерия оптимальности A

Figure 2. The digital model of the site and the corresponding matrices of relative heights H and the optimality criterion A

На продольные уклоны пути наложены ограничения в виде тангенсов предельно допустимых углов дифференцированно по направлениям: i_r – в грузовом, i_n – в не грузовом.

В общем виде оптимальный путь ищется на некотором подмножестве $E\{N_1, N_2, M_1, M_2\} = \{V_{ij} | 1 \leq N_1 \leq i \leq N_2 \leq N, 1 \leq M_1 \leq j \leq M_2 \leq M\}$.

В частности, глобальная ЦММ в этих обозначениях запишется как $E\{1, N, 1, M\}$. В матрицах A и H множеству $E\{N_1, N_2, M_1, M_2\}$ соответствует блоки $\{A_{ij}\}_{\substack{i=N_2, j=M_2 \\ i=N_1, j=M_1}}, \{H_{ij}\}_{\substack{i=N_2, j=M_2 \\ i=N_1, j=M_1}}$.

$$\frac{i=N_2, j=M_2}{i=N_1, j=M_1}$$

Возможность «вырезать» таким образом, отдельный участок из общего плана местности позволяет исключить из рассмотрения заведомо удаленные от предполагаемой трассы точки ЦММ и сократить зону поиска оптимума (рисунок 3). Порядок просмотра вершин графа не влияет на конечный результат – положение оптимального пути, однако нерациональный способ может существенно увеличить количество итераций алгоритма до стабилизации значений критерия в его вершинах (элементов матрицы A). Опыт эксплуатации программного модуля, реализующего алгоритм просмотра вершин, показал, что удовлетворительное число итераций достигается при следующем порядке просмотра.

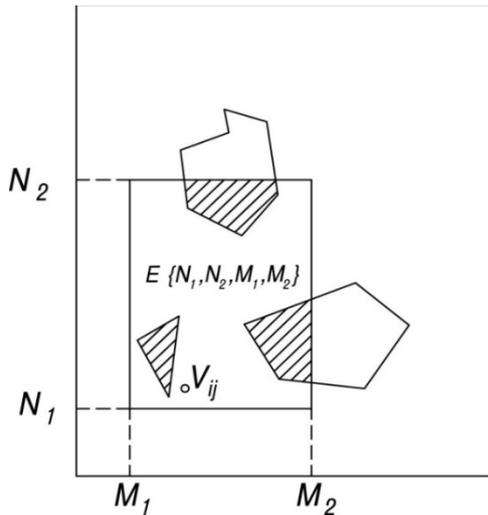


Рисунок 3. Локализация участка поиска оптимального варианта трассы

Figure 3. Localization of a site of search of an optimum variant of a line

Исходное множество $E\{N_1, N_2, M_1, M_2\}$ разбивается прямыми, проходящими через начальную точку V_{i_0, j_0} параллельно осям координат, на четыре квадранта (рисунок 4), каждый из которых просматривается в последовательности:

- I квадрат – справа налево, снизу вверх,
- II квадрат – слева направо, снизу вверх,
- III квадрат – справа налево, сверху вниз,
- IV квадрат – слева направо, сверху вниз.

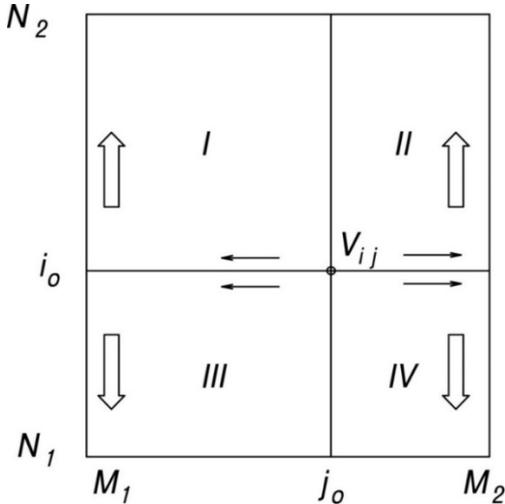


Рисунок 4. Порядок просмотра вершин множества
Figure 4. The order of viewing the vertices of the set

Например, для I квадрата последовательность просматриваемых вершин в координатной записи будет такой (отождествляем вершину с парой ее координат):

$$\begin{aligned}
 & (i_0, j_0 - 1) (i_0, j_0 - 2) \dots (i_0, M_1 + 1). \\
 & (j_0 + 1, j_0) (i_0 + 1, j_0 - 1) \times \\
 & \times (i_0 + 1, j_0 - 2) \dots (i_0 + 1, M_1 + 1). \\
 & (N_2 - 1, j_0) (N_2 - 1, j_0 - 1) \times \\
 & \times (N_2 - 1, j_0 - 2) \dots (N_2 - 1, M_1 + 1).
 \end{aligned}$$

Не просматриваются вершины V_{i_0, j_0} и вершины, окаймляющие $E\{N_1, N_2, M_1, M_2\}$, (т. е. имеющие первую координату N_1 или N_2 , либо вторую M_1 или M_2).

Исключение из просмотра граничных вершин множества $E\{N_1, N_2, M_1, M_2\}$ обусловлено двумя причинами. Первая – это единство процедуры просмотра и компактный вид программы для ЭВМ. Вторая, более важная причина, заключается в возможности локализовать зону поиска оптимума, задавая, например, «отвесные стенки», приписывая граничными вершинами «бесконечные» высоты H_{ij} .

Это гарантирует замкнутость множества E : «наткнувшись на стенку», путь не выйдет за пределы E , поиск в этом случае ведется в глубокой «потенциальной яме» (рисунок 5). Кстати, таким же образом можно вписать участок местности любой конфигурации в прямоугольную сетку ЦММ.

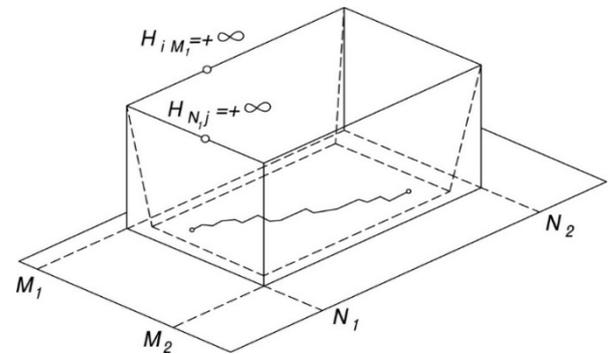


Рисунок 5. Локализация области поиска «отвесными стенками»

Figure 5. Localization of the search area by “sheer walls”

Размеры локализуемого участка зависят от топографии местности и должны определяться с учетом особенностей конкретной моделируемой территории – степени влияния удаленных объектов на положение трассы дороги, вытянутости отдельных складок местности и прочих факторов, которые могут «замаскировать» некоторые оптимальные пути и натолкнуть на ложный вариант. В качестве иллюстраций к высказанным предостережениям приведем пример участка местности с «вытянутым хребтом» (рисунок 6). Разумеется, от подобных «риффов» не застрахован и глобальный прямоугольник $E\{1, N, 1, M\}$, поэтому моделированию конкретного участка местности должен предшествовать содержательный анализ ситуации.

Просмотр одной вершины V_{ij} включает в себя последовательный перебор 8-ми входящих в эту вершину дуг $U_{i+1, j-1}^{ij}, U_{i+1, j}^{ij} \dots U_{i, j-1}^{ij}$, для которых определяются их цены $\tilde{n}_{i, j}^{ij}$, и значения критерия полагается равным $A_{ij} = \min_{i, j'} (A_{i, j'} + C_{i, j'}^{ij})$.

При определении цены дуги $\tilde{n}_{i, j}^{ij}$ могут встретиться три случая.

Первый случай. Уклон превышает допустимый. Цена дуги полагается равной очень большому числу: $\tilde{n}_{i,j}^{ij} = +\infty$

Тангенс допустимого угла наклона α дуги $U_{i,j}^{ij}$, должен находиться в пределах:

$-i_r \leq \operatorname{tg} \alpha \leq i_n$ – если заданное грузовое направление

$-i_n \leq \operatorname{tg} \alpha \leq i_r$ – если заданное не грузовое направление.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_{ij} - H_{i'j'}}{\alpha}$$

где $\alpha = \begin{cases} \text{диагональ квадрата сетки, если } |i-i'| + |j-j'| = 2 \\ \text{сторона квадрата сетки в остальных случаях} \end{cases}$

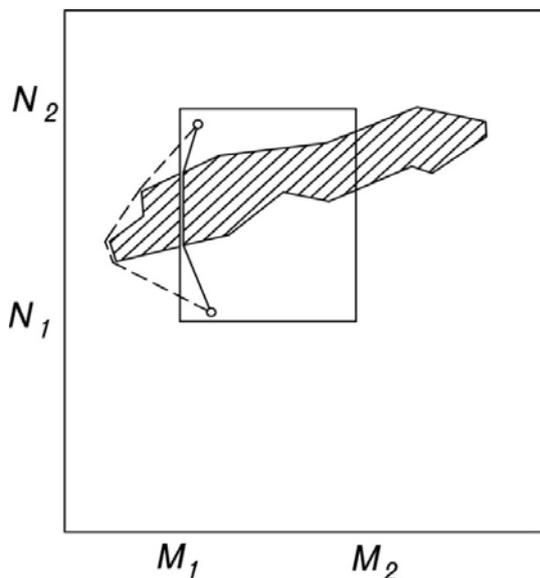


Рисунок 6. Пример маскировки истинного оптимального пути при ошибочной локализации области поиска оптимума: ----- – истинный оптимальный путь, ————— – ложный

Figure 6. Example of masking the true optimal path for an erroneous localization of the search area of the optimum:----- – the true optimal way, ————— – false

Второй случай. Дуга $U_{i,j}^{ij}$, имеет допустимый уклон и принадлежит области неоднородности D_τ .

$$\tilde{n}_{i,j}^{ij} = c_\tau * l_{i,j}^{ij},$$

где c_τ – цена области D_τ ; $l_{i,j}^{ij} = \sqrt{(H_{ij} - H_{i'j'})^2 + a^2}$.

Дуга $U_{i,j}^{ij}$, принадлежит D_τ тогда и только тогда, когда обе вершины V_{ij} и $V_{i'j'}$ принадлежит D_τ .

Факт принадлежности точки выпуклой области, ограниченной отрезком прямых, устанавливается средствами векторного анализа.

Пусть на плоскости π с положительно ориентированной системой координат xOy задана выпуклая область D с кусочно-линейной

границей σD . Граничные точки соединения отрезков перенумеруем по часовой стрелке, начиная с любой: A_1, A_2, \dots, A_k .

Вектор с началом в точке A и концом в точке B будем обозначать \overrightarrow{AA} .

Пусть B – произвольная точка плоскости π . Чтобы B принадлежала области D необходимо и достаточно, чтобы одновременно выполнялись неравенства:

$$[\overrightarrow{A_i B}, \overrightarrow{A_i A_{i+1}}]_z \geq 0, [\overrightarrow{A_k B}, \overrightarrow{A_k A_1}]_z \geq 0, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, k-1$$

Здесь квадратные скобки означают векторное произведение, а индекс z единственную отличную от нуля координату векторного произведения двух векторов, лежащих в одной плоскости. Доказательство очевидно.

Таким образом, принадлежность точки (вершины квадрата сетки ЦМР) области неоднородности D_τ устанавливается последовательной проверкой справедливости неравенств (1).

Если хотя бы одно из них не выполняется, то точка лежит вне области. Как известно, третья координата векторного произведения двух векторов $\vec{a} = (a_x, a_y, 0)$, $\vec{b} = (b_x, b_y, 0)$ очень просто выражается через координаты этих векторов: $[\vec{a}, \vec{b}]_z = a_x * b_y - a_y * b_x$, что обеспечивает высокую эффективность и быстродействие описанного способа определения взаимного положения точки и области.

Третий случай. Дуга $U_{i,j}^{ij}$, имеет допустимый уклон, принадлежит области неоднородности D_τ и пересекается с линейным участком неоднородности, имеющим цену c_p .

В этом случае цена дуги определяется так: $\tilde{n}_{i,j}^{ij} = c_\tau * l_{i,j}^{ij} + c_p$.

Факт пересечения дуги с линейным участком неоднородности устанавливается следующим образом. Сначала выясняется принадлежность обеих концевых точек дуги одному из прямоугольников P_k , построенных на отрезках ломаной линии, описывающей данный участок неоднородности (рисунок 7). Если найдется такой прямоугольник, то определяется факт пересечения дуги с его диагональю – отрезком ломаной.

Учитывая необходимость многократного определения факта принадлежности точки прямоугольным множеством на плоскости в процессе решения задачи оптимального трассирования, вычислительным аспектам этого вопроса было уделено особое внимание. Для повышения эффективности указанной процедуры разработан специальный аппарат так называемых вложенных сит [8, 9].

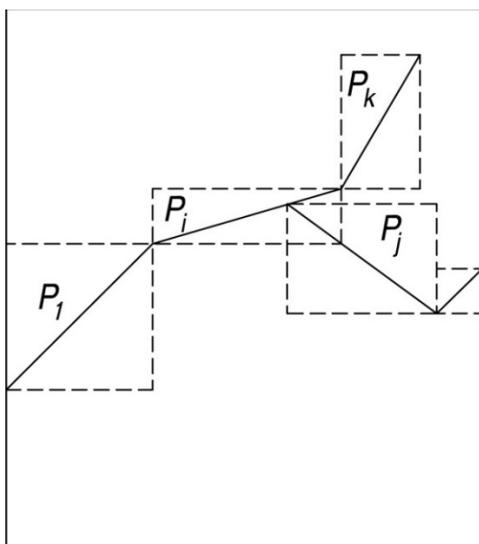


Рисунок 7. Определение дуг, пересекающихся с линейными участками неоднородности

Figure 7. Definition of arcs intersecting linear regions of heterogeneity

Сущность его заключается в определении оптимальной по быстродействию последовательности сравнений координат (x, y) произвольной точки $\xi(x, y)$ на плоскости с координатами системы прямоугольников для установления факта принадлежности этой точки одному из прямоугольников системы.

Основную идею поясним на примере одного прямоугольника $ABCD$ со сторонами, параллельными осями координат xOy (рисунок 8). Точки $\xi(x, y)$ будем считать принадлежащими некоторому объемлющему прямоугольнику $ABCD$ прямоугольнику X (аналог глобальной ЦММ). Уравнения сторон прямоугольника $ABCD$, соответственно, равны:

$$AB: y = i, BC: x = j, CD: y = k, AD: x = l.$$

Точка $\xi(x, y)$ принадлежит прямоугольнику $ABCD$ тогда и только тогда, когда одновременно выполняются четыре неравенства:

$$x \geq l, x \leq j, y \geq k, y \leq i. \quad (2)$$

На суммарное количество сравнений, которое потребуется выполнить для точек, не принадлежащих прямоугольнику $ABCD$ (для каждой принадлежащей $ABCD$ точки ξ таких сравнений будет, очевидно, оказывают влияние два фактора:

- порядок проверки справедливости неравенств (2),
- расположение прямоугольника $ABCD$ относительно объемлющего его множества X и параметры их обоих.

Действительно, если априори принять последовательность проверки неравенств (2) в том порядке, в каком они записаны выше, то для определения того, что точка $\xi_1(x_1, y_1)$ на рисунке 8 не принадлежит прямоугольнику $ABCD$, понадобится четыре сравнения, т. к. только последнее неравенство окажется невыполненным ($y_1 > i$). Для точки же $\xi_2(x_2, y_2)$ потребуется всего лишь одно сравнение ($x < l$).

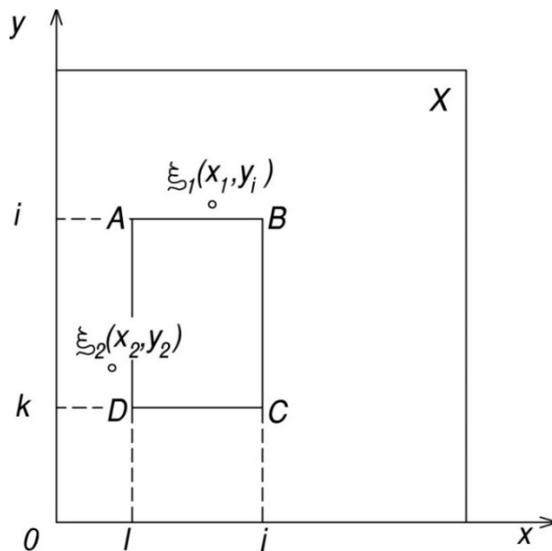


Рисунок 8. К методу вложенных сит определение дуг, пересекающихся с линейными участками неоднородности

Figure 8. To the method of embedded sieves, the definition of arcs intersecting linear regions of the inhomogeneity

Для системы из n прямоугольников ситуация существенно усложняется. Выбор неоптимальной последовательности сравнений (2) повышает трудоемкость процесса перебора точек множества X (узлов сетки ЦММ) примерно в 1,5 раза.

При постоянных коэффициентах z_0 и z_1 , входящих в выражение (1), цены областей неоднородности c_i являются сложными функциями продольного уклона пути i , от которого зависит скорость движения автопоезда $V(i)$.

Скорость движения лесовозного автопоезда, учитывая кусочно-линейный продольный профиль трассы дороги, определялась методом равновесных скоростей [10].

Величина полного сопротивления движению автопоезда $\Sigma W, H$ с учетом сопротивления воздушной среды принимались по формуле:

$$\Sigma W = Q_{op} (\omega \pm i_c), \quad (3)$$

где Q_{op} – масса автопоезда (тягача с роспуском или прицепом) брутто, т; ω – основное удельное сопротивление движению автопоезда, включая сопротивление воздушной среды, H/t ; i_c – сопротивление от уклона пути, H/t (+ для подъема, – для спуска); $i_c = 9,81 \cdot i$, где i – уклон пути, %.

Согласно рекомендациям [5] для лесовозных автомобильных дорог с покрытиями переходного типа (магистрала и ветки) и средних условий эксплуатации можно принимать:

$$\omega = 166,7 + 3,4 \cdot V,$$

где V – скорость движения автопоезда, км/ч.

Подставляя выражение для основного удельного сопротивления движению в формулу (3) для автопоезда КАМАЗ-43118 + ПРЛ11-КБ УСТ-94651, например получим дифференцированно по направлениям – грузовому и порожнему – следующие зависимости величины полного сопротивления движению от скорости и уклона:

В грузовом направлении:

$$\Sigma W = 39,7 \times (166,7 + 3,4V \pm i_n) = 6618,0 + 136,3 \times V \pm 39,7i_n$$

в порожнем направлении: (3)

$$\Sigma W = 16,7 \cdot (166,7 + 3,4V \pm i_n) = 2783,9 + 56,8 \cdot V \pm 16,7i_n$$

Графики зависимостей (3) для различных уклонов пути i с шагом $\Delta i = 5\%$ наносились на график тяговой характеристики тягача КАМАЗ-43118, построенный по данным [5].

Определенные графически значения равновесных скоростей сведены в таблице 1, по результатам которой построены графики равновесных скоростей и удельного времени хода автопоезда $t = \frac{1}{V}$ (рисунок 9).

Для автоматизации расчета скорости движения автопоезда и вывода компактной формулы $t = t(i)$ функция $t = \frac{1}{V}$ сглаживалась полиномами 2-й и 4-й степени. Коэффициенты полиномов определялись методом наименьших квадратов. Для указанного выше типа автопоезда были получены следующие зависимости:

в грузовом направлении:

$$t = (290,51597 + 6,13928i + 0,03876i^2)10^{-4},$$

$$t = \left(\begin{matrix} 293,23210 + 10,83532i + \\ + 0,01014i^2 - 0,00587i^3 + 0,00008i^4 \end{matrix} \right) 10^{-4} \quad (4)$$

в порожнем направлении:

$$t = (175,01509 - 1,24065 \cdot i + 0,02517i^2)10^{-4},$$

$$t = \left(\begin{matrix} 188,15483 - 2,65723i + \\ + 0,00037i^2 + 0,00100i^3 + 0,00001i^4 \end{matrix} \right) 10^{-4},$$

графически представленные на рисунке 9.

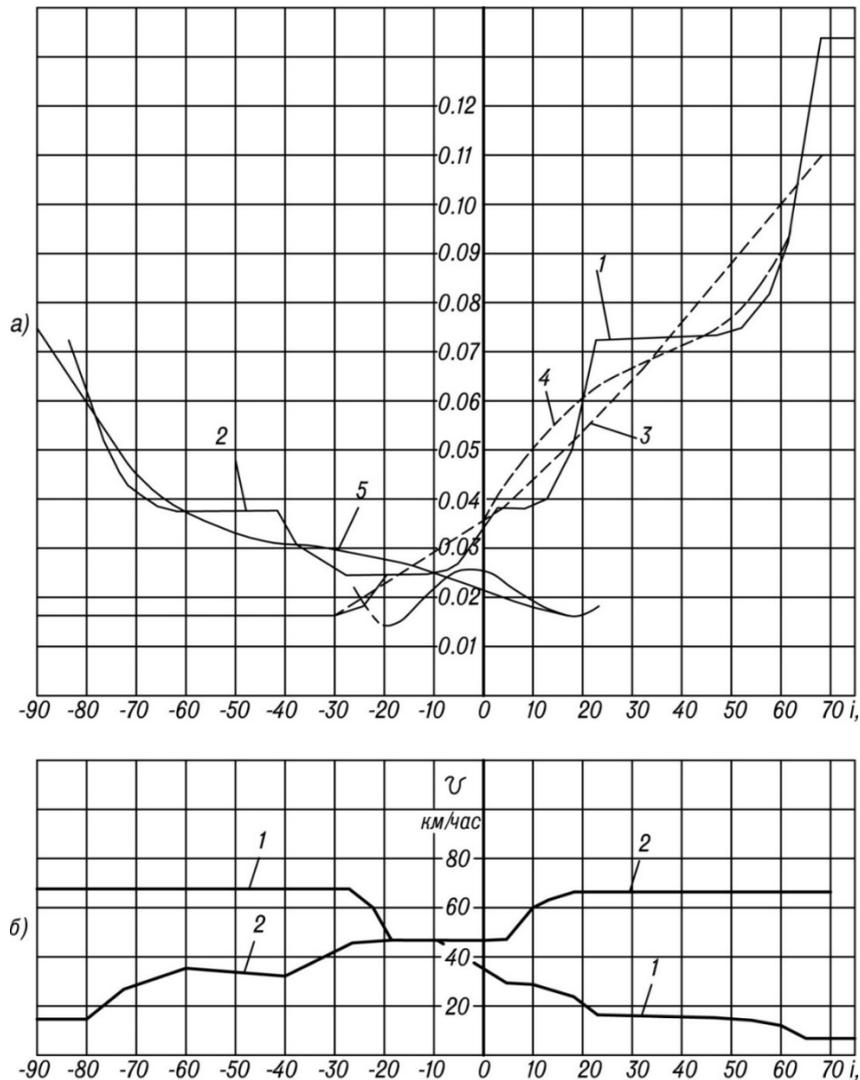


Рисунок 9. Зависимость темпа роста к скорости движения автопоезда от продольного уклона дороги: а) графики темпа движения; б) графики скорости движения; 1-для грузового направления; 2 – для порожнего направления; 3 – сглаживание полиномом 2 степени (грузовое направление.); 4 – сглаживание полиномом 4 степени (груз. напр.); 5 – то же полиномом 7 степени (пер.)

Figure 9. Dependence of the rate of growth on the speed of the road train from the longitudinal slope of the road: а) graphs of the rate of movement; б) speed charts; 1-for the freight direction; 2 – for empty direction; 3 – smoothing by a polynomial of the 2nd degree (freight direction.); 4-smoothing by a polynomial of 4 degrees (load eg); 5 – the same polynomial of degree 7 (trans)

Эффективность использования зависимости $t = t(i)$ в табличном виде (таблица 1) или в виде формул (4) определяется характером моделируемого рельефа, необходимой точностью расчетов. Если продольные уклоны трассы преимущественно находятся в интервалах $i \leq 10\%$, $i \geq 35\%$. Табличный вид задания $t(i)$ требует большого объема оперативной памяти компьютера и в среднем увеличивается время расчетов по сравнению с формулами (4) обеспечивает компактный вид записи функции и экономии ресурса компьютера, но в среднем приводит к менее точным результатам. В программном обеспечении описываемой модели (1) предусмотрены все три варианта задания функции $t(i)$, выбор одного из них осуществляется на этапе настройки системы программ.

Поскольку двигатели лесовозных автопоездов эксплуатируются, как правило, в режиме дросселирования (на частичных характеристиках), а равновесные скорости определяются по внешним характеристикам двигателя, то для перехода от расчетных скоростей к действительным скоростям движения автопоезда используется коэффициент 0,87, полученный экспериментальным путем исследователями [2, 4].

После того как на p -й итерации просмотрены все вершины множества $E\{N_1, N_2, M_1, M_2\}$ подсчитывается сумма всех значений критерия в вершинах

$$S_p = \sum_{\substack{i=N_1 \\ j=M_1}}^{\substack{i=N_2 \\ j=M_2}} A_{ij}$$

Процесс изменения значений A_{ij} заканчивается, когда два последовательных числа S_k и S_{k+1} совпадут

$$S_1 > S_2 > \dots > S_k = S_{k+1} = \dots \quad (5)$$

Значение k – общее количество итераций до стабилизации матрицы критерия – характеризует сходимость алгоритма и зависит от конкретной задачи – сложность рельефа, численности, конфигураций и взаимного расположения областей и линейных участков неоднородности. При решении практических задач трассирования лесовозных автомобильных дорог на реальных территориях k варьировалось от 2 до 16, хотя при искусственно моделируемых ситуациях в период отладочных работ значение k достигало 25–27.

В процессе работы блока оптимизации выполняется аппроксимация эскизной линии элементами трассы в пределах первоначально заданной последовательности, то есть меняются только величины геометрических характеристик элементов, но не их количество и тип. Вместе с тем независимо от способа формирования исходного приближения, довольно часто появляется необходимость просматривать варианты проектируемой трассы, отличающиеся последовательностью элементов.

Таблица 1.

Зависимость скорости движения автопоезда КАМАЗ-43118 + ПРЛ11-КБ УСТ-94651 от продольного уклона гравийной дороги

Table 1. Dependence of the speed of the KAMAZ-43118 + PRL11-KB road UST-94651 on the longitudinal slope of the gravel road

Продольный уклон, %	Направление движения автопоезда			
	грузовое		порожнее	
	Скорость, км/ч	Темп, ч/км	Скорость, км/ч	Темп, ч/км
-30	71,1	0,0141	71,1	0,0141
-25	64,0	0,0156	71,1	0,0141
-20	47,1	0,0212	71,1	0,0141
-15	47,1	0,0212	67,6	0,0148
-10	47,1	0,0212	60,0	0,0167
-5	44,2	0,0226	50,0	0,0200
0	36,0	0,0278	47,1	0,0212
5	31,0	0,0323	47,1	0,0212
10	31,0	0,0323	47,1	0,0212
15	29,2	0,0342	47,1	0,0212
20	24,0	0,0417	47,1	0,0212
25	16,25	0,0615	47,1	0,0212
30	16,25	0,0615	47,1	0,0212
35	16,25	0,0615	42,4	0,0236
40	16,25	0,0615	37,7	0,0265
45	16,25	0,0615	31,0	0,0323
50	16,25	0,0615	31,0	0,0323
55	16,0	0,0625	31,0	0,0323
60	14,7	0,0680	31,0	0,0323
65	12,5	0,0800	31,0	0,0323
70	8,98	0,1114	30,6	0,0327
75	8,98	0,1114	28,4	0,0352
80	8,98	0,1114	25,6	0,0391
85	8,98	0,1114	21,4	0,0467
90	8,98	0,1114	16,25	0,0615

Последовательности (5) соответствует последовательность матриц критерия $A_1, A_2, \dots, A_k = A_{k+1} = \dots$

Символически процесс стабилизации матрицы A критерия можно представить в виде последовательности воздействия на A некоторого оператора ζ :

$$A_p = \zeta(A_{p-1}), p = 2, 3, \dots, k + 1,$$

где A_1 имеет специальный вид: $\dot{A}_{i_0 j_0} = 0, A_{ij} = +\infty$ для всех $(i, j) \neq (i_0, j_0)$.

A_{k+1} в этих обозначениях запишется: $A_{k+1} = \zeta(A_k) = \zeta(\zeta(A_{k-1})) = \dots = \zeta^k(A_1)$.

Оператор ζ зависит от точки $V_{i_0 j_0}$ и процедуры определения цен дуг графа G . Для заданной ЦММ при фиксированном типе транспортных средств на вывозке и дорожного покрытия цены определяются автоматически в зависимости от объема вывозимой древесины Q и направления грузового движения τ (τ – задано грузовое направление, τ – негрузовое). С учетом этого можно записать:

$$A_{k+1} = [\zeta(V_{i_0 j_0}, Q, \tau)]^k(A_1) \quad (6)$$

Такая символическая форма записи решения задачи о нахождении оптимального варианта лесовозной автомобильной дороги для вывозки сосредоточенного объема древесины поможет в дальнейшем создать пакет программ.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Lawrence C.J. The use Landsat imagery as a basis for materials inventories and terrain maps // TRRL Suppl.rept, 2013, №. 690. С. 117-121.
- 2 Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Т. 12. №. 2, С. 511-515
- 3 Козлов В.Г., Чан Ван Зы, Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В., Чернышова Е.В. Микроскопические модели движения транспортных потоков при перевозке грузов в агропромышленном комплексе, Воронеж, ВГУИТ, 2015. С. 104-112.
- 4 Курьянов В.К., Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Морковин В.А. Модель режимов движения транспортных потоков на лесовозных автомобильных дорогах // Лесной журнал. 2014. № 2 (338). С. 61-67.
- 5 Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Дорохин С.В., Бурмистров В.А. Повышение качества и эффективности технической эксплуатации автотранспортных средств по результатам исследований их эксплуатационной надежности с применением методов имитационного моделирования. Монография, Воронеж, 2013.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Елена В. Чернышова аспирант, кафедра информационной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, elenabok@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Елена В. Чернышова Полностью подготовила рукопись и несет ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 29.03.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 28.04.2017

REFERENCES

- 1 Lawrence C.J. The use Landsat imagery as a basis for materials inventories and terrain maps. *TRRL Suppl.rept*, 2013, no. 690. pp. 117-121.
- 2 Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. vol. 12. no. 2, pp. 511-515
- 3 Kozlov V.G., Chan Van Zy, Kondrashova E.V., Skvortsova T.V., Chernyshova E.V. Mikroskopicheskie modeli dvizheniya transportnykh potokov pri perevozke gruzov v agropromyshlennom komplekse [A microscopic model of traffic flow for the carriage of goods in the agricultural sector]. Voronezh, VGUIT 2015. 104-112 p. (in Russian).
- 4 Kur'yanov V.K., Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V., Morkovin V.A. Model modes of traffic on the logging roads. *Lesnoi zhurnal* [Forest magazine]. 2014. no. 2 (338). pp. 61-67. (in Russian).
- 5 Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V., S.V., Dorokhin V.A. Povyshenie kachestva i effektivnosti tekhnicheskoi ekspluatatsii avtotransportnykh sredstv po rezul'tatam issledovaniy ikh ekspluatatsionnoi nadezhnosti s primeneniem metodov imitatsionnogo modelirovaniya. Monografiya [Improving the quality and efficiency of technical operation of motor vehicles by the results of their research of operational reliability with the use of simulation methods. Monograph]. Voronezh 2013. p. (in Russian).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Elena V. Chernyshova graduate student, information security department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, elenabok@mail.ru

CONTRIBUTION

Elena V. Chernyshova Completely prepared the manuscript and is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The author declare no conflict of interest.

RECEIVED 3.29.2017

ACCEPTED 4.28.2017