

Методология выбора трасс для прокладки сетей и коммуникаций

Г. Ы. Токтошов¹

Предлагается новая методика выбора трасс для прокладки инженерных коммуникаций, учитывающая насыщенность городской застройки различными инфраструктурными объектами инженерного обеспечения, вид и назначение проектируемой коммуникации, углы поворота коммуникации вокруг заданной оси при обходе препятствий и другие ограничения. В отличие от традиционного представления, трасса для прокладки коммуникаций рассматривается как объект в трехмерном пространстве, имеющий ограничение как по плану, так и по профилю – по высоте расположения сетевых объектов. Кроме того, область, на которой предполагается разместить сеть, рассматривается как трехмерное пространство и моделируется в виде трехмерной расчетной сети. Задача оптимизации коммуникаций поставлена в виде построения минимальной гиперсети при ограничениях и требованиях, накладываемых на проектируемую коммуникацию. Предложен модифицированный метод трассировки лучей, позволяющий выбрать трассу в зависимости от угловых и линейных координат, предопределяющих положение проектируемой коммуникации в пространстве.

Ключевые слова: трасса, инженерная коммуникация, инфраструктура, граф, гиперсеть, трехмерное преобразование.

1. Введение

Сети инженерных коммуникаций современного города обслуживают населенные пункты, промышленные зоны, торговые центры и культурно-бытовые предприятия. Всё это представляет собой комплексную систему, состоящую из инженерных коммуникаций, сооружений и специальных устройств. Современная инженерная коммуникация – это сложный территориально-распределенный комплекс, который выполняет такие жизненно важные функции, как обеспечение потребителей энергетическими и водными ресурсами, средствами связи, информацией, маршрутной сетью, транспортом и другими сетевыми услугами. Следует отметить, что развитие современного города характеризуется динамичностью и противоречивостью. Чрезвычайно быстрый рост городов создает немало социальных и экономических проблем, возникает необходимость построения новых населенных пунктов и соответствующих сетей инженерных коммуникаций для их обслуживания и т.п. Другими словами, для удовлетворения потребностей населенных пунктов и промышленных зон требуется создание новых или расширение существующих сетей инженерных коммуникаций, обеспечивающих передачу целевого продукта от источников к потребителям.

Отметим, что в настоящее время территория, на которой предполагается размещение инженерной коммуникации, чрезвычайно насыщена различными сетями инженерного назначения, такими как газо-, нефте-, и водопроводы, сети электросвязи и электропередач, сети автомобильных и железнодорожных линий и т.п. Все эти сети должны быть учтены на этапе проектирования сетей, так как на данном этапе определяется взаимное расположение и взаи-

¹ Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (0251-2021-0005).

модействие элементов различных сетей. В связи с этим возникает задача оптимального пространственного размещения сетей инженерных коммуникаций в условиях насыщенности городской территории.

Одной из задач, связанной с размещением сетей инженерных коммуникаций в пространстве, является выбор трассы их прокладки, учитывающей насыщенность городской застройки, вид и назначение проектируемой коммуникации, ограничения планового и профильного характера, углы поворота коммуникации вокруг заданной оси при обходе препятствий и другие ограничения. В настоящей работе предложена новая модель пространственного размещения коммуникаций, основанная на трехмерной сетке и методах трёхмерного преобразования.

2. Задачи о выборе трассы для прокладки коммуникаций

Отметим, что существуют различные постановки задачи о выборе трасс (как дискретные, так и непрерывные) для прокладки коммуникаций различного назначения между заданными парами точек области размещения D . Например, одна из задач, связанных с прокладкой автомобильной дороги из пункта A в пункт B , имеющая минимальную стоимость, формулируется следующим образом [1]: на двумерной области $D \in R^2$ задана непрерывная или кусочно-непрерывная функция $f(x, y) \geq 0$, соответствующая стоимости строительства дороги в точке $(x, y) \in D$. Тогда стоимость строительства автомобильной дороги из точки A в точку B по выбранному маршруту μ вычисляется следующим образом:

$$C(\mu) = \int_{\mu} f(x, y) d\mu.$$

Пусть $\mu(A, B)$ – множество всех возможных маршрутов прокладки автомобильной дороги из точки A в точку B , представляющие из себя непрерывные кривые в области $D \in R^2$. Тогда задача заключается в поиске такой кривой μ_0 среди всех $\mu(A, B)$, вдоль которой функция стоимости $C(\mu)$ принимает наименьшее значение:

$$\min_{\mu_0 \in \mu(A, B)} C(\mu) = \int_{\mu_0} f(x, y) d\mu.$$

Аналогичным образом в непрерывной постановке можно сформулировать задачи поиска трассы для других типов коммуникаций.

В качестве альтернативы для выбора трассы прокладки коммуникаций используют дискретные математические модели, суть которых заключается в формировании множества всех возможных маршрутов для прокладки коммуникаций и выборе среди них наиболее оптимального по заданному критерию. В дискретной постановке задачи выбор трассы для прокладки коммуникаций из пункта A в пункт B заключается в выборе маршрута, имеющего минимальную стоимость μ_{AB} среди всех маршрутов $\mu(A, B)$ между заданными парами вершин A и B на графе $G = (V, E)$, т.е.:

$$C(\mu_{AB}) = \min_{\mu(A, B)} \left(\sum_{(i, j) \in \mu} c_{ij} \right),$$

где $\mu(A, B)$ – множество всех возможных маршрутов из A в B ;

μ_{AB} – маршрут, обеспечивающий минимальность стоимости перехода из A в B ;

c_{ij} – стоимость перехода из i в j , являющихся звеном маршрута μ_{AB} , т.е. $(i, j) \in \mu_{AB}$.

Отметим, что использование дискретной математической модели для выбора маршрутов прокладки коммуникаций более целесообразно с точки зрения сложности и реализации вычислительного алгоритма, поскольку на практике число возможных вариантов трасс для прокладки сетей является конечным. В связи с этим в настоящей работе исследование задач о выборе трасс для прокладки сетей и коммуникаций было проведено в рамках моделей теории графов и гиперсетей.

3. Анализ моделей и методов оптимизации трассы

Разработано множество моделей и методов по выбору трасс для прокладки сетей и коммуникаций различного назначения. Так, например, в [2, 3] предложены модели по снижению стоимости строительных и эксплуатационных затрат магистральных и распределительных сетей, в [4, 5, 6] – выбор структуры газотранспортной сети по критерию минимума строительных затрат на основе методов линейного и нелинейного программирования, а также алгоритма имитации отжига, в [7, 8, 9] – выбор оптимальной структуры водопроводной сети на основе моделей имитационного и вероятностного анализа, а также модели гидравлической сети, и другие. С точки зрения дискретной оптимизации все задачи, связанные с выбором трассы для прокладки сетей и коммуникаций, обладают общими свойствами, описываемыми структурными моделями, такими как тензоры и морфологические таблицы [10, 11], избыточные схемы [12, 13], альтернативные деревья [14, 15], сэндвич-графы [16], вложенные графы [17], многослойные сети [18, 19], многоуровневые комплексные сети [20] и другие. Отметим, что все существующие модели и методы оптимизации трасс предполагают размещение проектируемой сети и коммуникации на заданной поверхности без учета их иерархичности. С другой стороны, в них не учитывается пространственное положение будущей коммуникации, зависящей от существующих сетей и коммуникаций, наличия естественных и искусственных преград, ограничения планового и профильного характера и т.п. В связи с этим в качестве математической модели для описания иерархичности сетей и коммуникаций в настоящей работе предлагается использовать гиперсетевую математическую модель [21], которая относительно просто и компактно описывает вложенность проектируемой коммуникации по выбранной трассе. При этом стоит отметить, что дискретный аналог городской территории моделируется графом первичной сети (primary network, PN), структура проектируемой сети – графом вторичной сети (secondary network, SN), а вложенность вторичной сети SN в первичную сеть PN – гиперсетью (hypernet, HN). Далее приведем достаточно простое определение двухуровневой гиперсети HN, которая определяется следующим образом.

Определение. Гиперсеть $HN = (X, V, R; P, W, F)$ – это иерархический математический объект, содержащий:

на уровне первичной сети PN:

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – множество вершин;

$V = (v_1, v_2, \dots, v_g)$ – множество возможных трасс;

$P(v): V \rightarrow 2^X$ – отображение, сопоставляющее каждому элементу $v \in V$ множество $P(v) \subseteq X$ его вершин, определяющее граф первичной сети $PN = (X, V; P)$;

на уровне вторичной сети SN:

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_p)$ – множество узловых элементов сети;

$R = (r_1, r_2, \dots, r_m)$ – множество ребер (линейные сооружения);

$W: r \rightarrow 2^{P(F(r))}$ – отображение, сопоставляющее каждому элементу $r \in R$ подмножество $W(r) \subseteq P(F(r))$ его вершин, где $P(F(r))$ – множество вершин PN, инцидентных ветвям $F(r) \subseteq V$, определяющее граф вторичной сети $SN = (Y \subseteq X, R; W)$. На практике SN соответствует структуре проектируемой сети.

Тогда отображение $F(r): R \rightarrow 2^V$, сопоставляющее каждому ребру $r \in R$ графа вторичной сети SN определенный маршрут из ветвей $v \in V$ в графе первичной сети PN , определяет гиперсеть HN . Таким образом, вложенность инженерной коммуникации по выбранным трассам определяется гиперграфом $FS = (V, R; F)$, т.е. ветвь $v \in V$ графа PN инцидентна ребру $r \in R$ тогда и только тогда, когда ребро r проходит (реализовано) по соответствующей ветви v , а отображения графа SN в PN называются гиперсетью $HN = (PN, SN; F)$.

На рис. 1 граф первичной сети PN представлен в виде решетки (рис. 1а), граф вторичной сети SN – в виде мультиграфа (рис. 1б), а одно из возможных отображений ребер $r \in R$ графа вторичной сети SN по определенным маршрутам $F(r) \in V$ в графе первичной сети PN – в виде гиперсети $HN = (PN, SN; F)$ (рис. 1с).

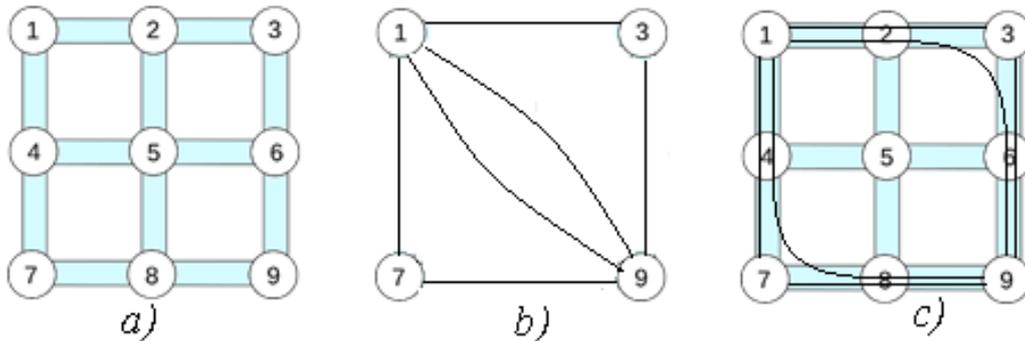


Рис. 1. Пример гиперсети

Отметим, что в нашем случае граф первичной сети PN представляет собой трехмерную расчетную сеть с шагами l_x , l_y и h , где белые кружочки (узлы) – это препятствия или запрещенные зоны, которые необходимо обходить при прокладке коммуникаций, а черные узлы (отмеченные буквами) – это свободные узлы, которые разрешено соединить трассой, находясь в одном из них. Например, на рис. 2 одна из возможных трасс между свободными узлами A и C выделена синим цветом.

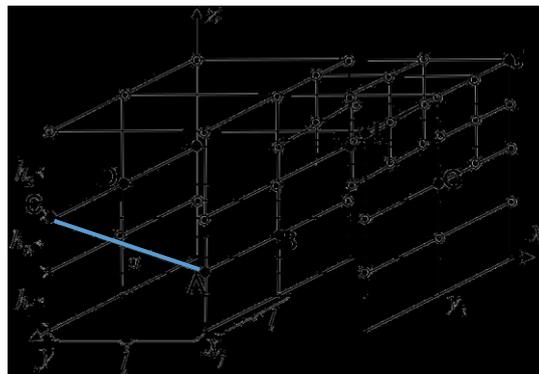


Рис. 2. Граф первичной сети PN

Таким образом, граф первичной сети PN в общем случае представляет собой дискретный аналог трехмерного пространства, в котором предполагается строить коммуникации. В зависимости от вида отображения $F: R \rightarrow 2^V$, т.е. от вида вложения вторичной сети в первичную сеть $SN \rightarrow PN$, возникают различные прикладные задачи в области проектирования и строительства сетей различного назначения.

4. Стратегия выбора маршрутов прокладки коммуникаций

Всякий маршрут μ между заданными парами точек в трехмерной сетке состоит из последовательности ветвей $v_i \in V, i=1, \dots, n$ графа первичной сети PN . Чтобы выбрать очередную i -ю ветвь $v_i \in V$, входящую в маршрут, сделаем следующее допущение: целевая (конечная) точка находится справа от начальной точки относительно оси Ox в трехмерном пространстве; линейные координаты $x_{нач}, y_{нач}, z_{нач}$ начала i -й ветви $v_k \in V$ совпадают с началом координат в местной системе $Ox_i y_i z_i$, а угловые координаты начала $\alpha_{нач} = \beta_{нач} = \gamma_{нач} = 0$.

Для координат начала $(x_{нач}, y_{нач}, z_{нач})$ и конца $(x_{кон}, y_{кон}, z_{кон})$ i -й ветви $v_k \in V$ введем следующие обозначения:

$$\Delta x = x_{нач} - x_{кон}; \quad \Delta y = y_{нач} - y_{кон}; \quad \Delta z = z_{нач} - z_{кон}$$

и предположим, что $\Delta x \geq 0$, $\Delta y \neq 0$ и $\Delta z \neq 0$, т.е. целевая точка находится справа от начальной точки относительно оси Ox в трехмерном пространстве. На рис. 3 показаны возможные варианты перехода из точки с координатами $(x_{нач}, y_{нач}, z_{нач})$ к соседней точке с координатами $(x_{кон}, y_{кон}, z_{кон})$ по принципу восьмисвязности в трехмерном пространстве.

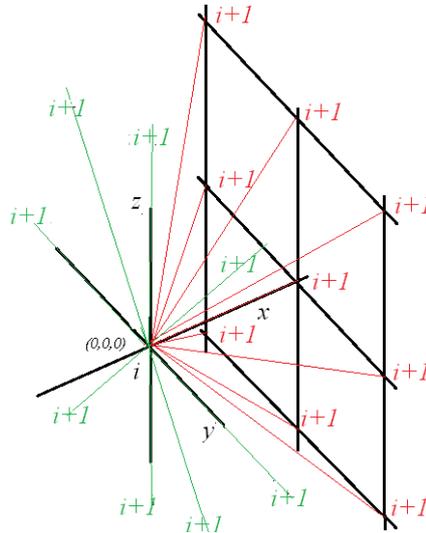


Рис. 3. Возможные направления выбора ветви

Красными линиями показаны возможные переходы из i -й местной системы координат $Ox_i y_i z_i$ в $(i+1)$ -й $Ox_{i+1} y_{i+1} z_{i+1}$ на один шаг по диагонали с одной ступенью и вдоль оси Ox . Зелеными линиями показаны возможные переходы в пределах i -й местной системы координат $Ox_i y_i z_i$, т.е. на плоскости yOz . Для решения некоторых практических задач допускается переход из данной точки к соседним, находящимся на расстоянии двух, трех или более ступеней.

Отметим, что при переходе из точки в точку необходимо соблюдать следующие ограничения и требования:

- $v_i \subset PN$ – выбранная ветвь графа первичной сети PN для прокладки ребер $r \in R$ графа вторичной сети SN должна находиться внутри области размещения;
- $v_i \not\subset PN_s$ – выбранная ветвь графа первичной сети PN для прокладки ребер $r \in R$ графа вторичной сети SN не должна проходить через запретные зоны в виде оврагов, водоемов, социальные объекты и т.п.;

- с) если $\alpha \leq \alpha_{up}$, то выбор i -й ветви $v_i \in V$ на графе первичной сети PN с допустимым углом наклона для прокладки ребер $r \in R$ графа вторичной сети SN из точки с меньшей отметкой в точку с большей отметкой разрешен, в противном случае – нет;
- д) если $\alpha \geq \alpha_{down}$, то выбор i -й ветви $v_i \in V$ на графе первичной сети PN с допустимым углом наклона для прокладки ребер $r \in R$ графа вторичной сети SN из точки с большей отметкой в точку с меньшей отметкой разрешен, в противном случае – нет;
- е) если $\alpha \leq |\alpha_{side}|$, то выбор i -й ветви $v_i \in V$ на графе первичной сети PN для прокладки ребер $r \in R$ графа вторичной сети SN горизонтально по поверхности склона разрешен, в противном случае – нет. Понятно, что если заданная область, на которой намечено строительство сетей, имеет склон, то $\{\alpha_{up}, \alpha_{down}, \alpha_{side}\} < 90^\circ$.

5. Гиперсетевая постановка задачи о выборе трассы

Пусть известны предполагаемые структуры первичной $PN = (X, V)$ и вторичной сети $SN = (Y, R)$ некоторой гиперсети HN . Тогда задача поиска трассы на графе первичной сети PN и отображения ребер графа вторичной сети SN по найденным трассам формулируется следующим образом.

Задача. Найти отображение

$$F^*(r): SN \rightarrow PN,$$

для которого

$$Q(HN) = \left(\sum_{v \in F^*(r), \forall r \in R} a(v) * T + \sum_{r \in R} b(r) \right) \rightarrow \min,$$

где $a(v)$ – стоимость ветвей первичной сети PN ;

$b(r)$ – стоимость ребер вторичной сети SN ;

при ограничениях и требованиях (а)–(е);

где $F^*(r) = \mu^*$ – оптимальный маршрут на графе первичной сети PN для прокладки ребра $r \in R$ графа вторичной сети SN ; T – композиция преобразований $T_{план}$ и $T_{профил}$ пространственной прямой (ветви) $v_i \in V$; α – угол между пространственной трассой, соединяющей некоторые пары узлов, и горизонтальной поверхностью.

Отметим, что задача построения гиперсети минимальной стоимости $Q(HN) \rightarrow \min$ даже в самой простой постановке без учёта матрицы пространственного преобразования и ограничений (а)–(е) является NP-трудной [22]. В связи с этим она может быть решена эвристическими методами, такими как генетический алгоритм, алгоритм муравьиной колонии, метод имитации отжига и т.п. В настоящей работе для решения поставленной задачи был предложен модифицированный алгоритм трассировки лучей, основанный на модели гиперсетей и методах трехмерного преобразования ветвей $v_i \in V$ графа PN , входящих в маршрут.

6. Модифицированный метод трассировки лучей

Для начала фиксируем план и профиль текущей ветви $v_i \in V$ (пространственной прямой) на соответствующие плоскости xOy и xOz . Согласно [23, 24] план пространственной прямой на плоскости xOy может быть получен путем поворота вокруг оси Y на угол β , затем поворота вокруг оси X на угол α и параллельного проецирования на плоскость $Z = 0$, а профиль на

плоскости xOz – путем поворота вокруг оси Z на угол γ , затем поворота вокруг оси X на угол α и параллельного проецирования на плоскость $Y=0$. Для этого применяются следующие виды преобразований:

$$T_{\text{план}} = T_{\text{пов. на } \beta \text{ вокр } y} \times T_{\text{пов. на } \alpha \text{ вокр } x} \times T_{\text{проец. на плоск. } z=0}$$

и

$$T_{\text{профил}} = T_{\text{пов. на } \gamma \text{ вокр } z} \times T_{\text{пов. на } \alpha \text{ вокр } x} \times T_{\text{проец. на плоск. } y=0}$$

где $T_{\text{пов. на } \alpha \text{ вокр } x}$, $T_{\text{пов. на } \beta \text{ вокр } y}$ и $T_{\text{пов. на } \gamma \text{ вокр } z}$ – матрицы преобразования вращения вокруг соответствующих осей симметрии.

Алгоритм состоит из двух ходов: прямого и обратного. В прямом ходе строятся всевозможные маршруты из начальной точки в целевую, в обратном ходе восстанавливается маршрут, соответствующий заданному критерию.

Прямой ход: пусть на $(i-1)$ -м шаге начальной точкой ветви $v_i \in V$ является $P_{i-1} = (x, y)$.

Предположим, что луч, исходящий из точки P_{i-1} , столкнется с точкой A и обратно вернется наблюдателю, т.е. точка A является препятствием для данного вида коммуникаций (не выполняется одной из условий (b)–(e)). Тогда обход препятствия через точки S_i или T_i производится по «жадной» стратегии, т.е.:

- если $(s - t) < 0$ то $P_i(x', y') = T_i(x + 1, y - 1)$, и $x' = x_i + 1, y' = y_i - 1$;
- если $(s - t) \geq 0$ то $P_i(x', y') = S_i(x + 1, y + 1)$ и $x' = x_i + 1, y' = y_i + 1$.

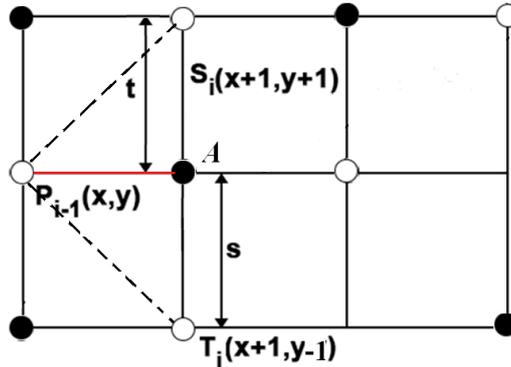


Рис. 4. Обход препятствий

В стратегии выбор точек S_i или T_i метрики s и t могут интерпретироваться как стоимость строительства коммуникаций из вершины P_{i-1} в S_i и T_i соответственно. Однако при решении практических задач вершины s и t могут быть выбраны неоднозначно, т.к. возможны случаи, когда $s - t = 0$. Это говорит о том, что иногда существует несколько различных минимальных путей между начальной и целевой точками.

Обратный ход: двигаясь в обратном направлении по заданному критерию оптимальности, например, по времени или стоимости строительства и эксплуатации коммуникаций, можно восстановить траекторию движения луча в неоднородной среде. Это производится путем восстановления прообразов вершин, входящих в маршрут, начиная от целевой точки и заканчивая начальной. Нетрудно заметить, что обход препятствия на плоскости xOz по профилю трассы осуществляется аналогичным образом, лишь с той разницей, что вместо координаты y фигурирует координата z .

В общем случае вычислительную сложность предлагаемого алгоритма можно оценить следующим образом:

прямой ход:

- для ветви $v_i \in V$, исходящей из некоторой начальной точки P_{i-1} , по N раз фиксируется план и профиль на плоскости проекций xOy и xOz , где N – число ветвей, входящих в трассу $F^*(r) \in V$. В итоге фиксация ветви $v_i \in V$ по плану осуществляется $j = 1, \dots, N$ раз, и при каждом изменении j фиксация по профилю также осуществляется $k = 1, \dots, N$ раз. Другими словами, при выполнении каждой из N итераций внешнего цикла по j внутренний цикл по k тоже выполняется N раз. Таким образом, общее количество итераций вложенного цикла по j и k равно $N \times N$, т.е. сложность преобразований пространственной прямой $v_i \in V$ на горизонтальную xOy и профильную xOz плоскости составляет $O(N^2)$;
- шаг за шагом выбираются целевые точки T_i или S_i в обход препятствия A (если они есть) согласно алгоритму трассировки лучей с вычислительной сложностью $O(N \times P)$ [25], в котором $P = |A|$, $P \leq N$ – число препятствий при выборе маршрута $F^*(r) \in V$.

обратный ход:

- список вершин графа PN , входящих в маршрут $F^*(r) \in V$, можно восстановить классическим алгоритмом Дейкстры за время $O(N^2)$.

Тогда сложность модифицированного алгоритма трассировки лучей приближенно составляет: $O(N^2) + O(N \times P) + O(N^2) \approx 3 \times O(N^2) \approx O(N^2)$.

7. Заключение

В настоящей работе была предложена новая методика выбора трасс для прокладки коммуникаций в трехмерном пространстве. В предлагаемой методике городская среда, в которой предполагается строительство коммуникаций, рассматривается как трехмерное пространство, содержащее существующие или вновь проектируемые градостроительные объекты. Как показано в работе, эти объекты, в свою очередь, либо способствуют, либо препятствуют строительству предполагаемой коммуникации. В связи с этим граф первичной сети PN целесообразно представить в виде трехмерной расчетной сетки, включающей в себя все запретные зоны и препятствия для прокладки проектируемой коммуникации. Для учета обхода препятствий в пространстве было предложено применить модели трёхмерного преобразования и теорию гиперсетей, а также методы трассировки лучей. Предложенная методика позволяет выбрать последовательность пространственных прямых, образующих маршрут из начальной точки в целевую в зависимости от их угловых и линейных координат, а также препятствия ситуационного и планового характера, которые предопределяют положение трассы в трехмерном пространстве. Так как задача является NP-трудной в сильном смысле этого слова, то она может быть решена эвристическими методами, являющимися комбинацией методов трехмерного преобразования, модифицированного алгоритма трассировки лучей и эволюционного синтеза.

Литература

1. Казаков А. Л., Лемперт А. А. Об одном подходе к решению задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике // Автоматика и телемеханика. 2011. № 7. С. 50–57.

2. *Djebedjian B., El-Naggar M., and Shahin I.* Optimal design of gas distribution network: a case study // *Mansoura Engineering Journal (MEJ)*. 2011. V. 36, № 3. P. 35–51.
3. *Heidarifar M., and Ghasemi H.* A network topology optimization model based on substation and node-breaker modeling // *IEEE Trans. on Power Systems*. 2016. V. 31, № 1. P. 247–255.
4. *Li F., Liu Q., Guo X., and Xiao J.* A survey of optimization method for oil-gas pipeline network layout // *Proc. International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC)*, April 1–3, 2015, Shenyang, China. P. 257–260.
5. *Edgar T. F., Himmelblau D. M., and Bickel T. C.* Optimal design of gas transmission networks // *SPE J.* 1978. № 18. P. 96–104.
6. *Dong G., Qing T., Du R., Wang C., Li R. et al.* Complex network approach for the structural optimization of global crude oil trade system // *Journal of Cleaner Production*. 2020. V. 251. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119366> (дата обращения: 19.01.2022).
7. *Liong S.-Y., and Atiquzzaman M.* Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution // *Journal of The Institution of Engineers (Singapore)*. 2004. V. 44, Is. 1. P. 93–107.
8. *Tricarico C., Gargano R., De Marinis G., Morley M. S., Kapelan Z., Savic D. A.* The influence of network topology on water distribution system performance // *Proc. 10th International Conference on Hydroinformatics (HIC)*, 2012, Hamburg, Germany, URL: https://www.researchgate.net/publication/230931471_The_Influence_of_Network_Topology_on_Water_Distribution_System_Performance (дата обращения: 28.01.2022).
9. *Lee H. M., Yoo D. G., Sadollah A., and Kim J. H.* Optimal cost design of water distribution networks using a decomposition approach // *Engineering Optimization*. 2016. V. 48, № 12. P. 2141–2156. URL: <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1157689> (дата обращения: 03.02.2022).
10. *Лебедев В. В., Деревяшкин В. М.* Тензорная модель сети связи // *Вестник СибГУТИ*. 2014. № 2. С. 50–56.
11. *Одрин В. М.* Метод морфологического анализа технических систем. М.: ВНИИПИ, 1989. 312 с.
12. *Стенников В. А., Чемезов А. А.* Применение алгоритма перебора деревьев и метода имитации отжига для схемно-структурной оптимизации тепловых сетей // *Программные продукты и системы*. 2018. № 2 (31). С. 387–395.
13. *Наумов И. В., Ямщикова И. В.* Математическое обоснование выбора оптимизационной модели трассировки электрической сети // *Евразийский Союз Ученых (ЕСУ)*. 2015. № 7 (16). С. 123–127.
14. *Степанов В. П.* Оптимизация маршрутов на дорожной сети // *Наука и образование*. 2012. № 5. С. 1–12.
15. *Акимов С. В.* Модель морфологического множества уровня идентификации // *Труды учебных заведений связи*. 2005. № 172. С. 120–135.
16. *Golumbic M. C., Kaplan H., Shamir R.* Graph sandwich problems // *Journal of Algorithms*. 1995. № 19 (3). P. 449–473. DOI:10.1006/jagm.1995.1047.
17. *Poulovassilis A., Levene M.* A nested-graph model for the representation and manipulation of complex objects // *J. ACM Trans. Inf. Syst.* 1994. V. 12. P. 35–68.
18. *Orlowski S., Koster A. M. C. A., Raack C., Wessäly R.* Two-layer network design by branch-and-cut featuring MIP-based heuristics // *Proc. 3rd International Network Optimization Conference (INOC)*, Spa, Belgium, 2007. P. 114–119.
19. *Capone A., Carello G., Matera R.* Multi-layer network design with multicast traffic and statistical multiplexing // *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM)*, Washington, USA, 2007. P. 2565–2570.
20. *Kurant M., Thiran P.* Layered complex networks // *J. Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 96. P. 1–4.
21. *Попков В. К.* О моделировании городских транспортных систем гиперсетями // *Автоматика и телемеханика*. 2011. В. 72, № 6. С. 179–189.

22. Токтошов Г. Ы., Юргенсон А. Н., Мигов Д. А. О сложности задач оптимизации сетей инженерных коммуникаций // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 9. С. 17–23.
23. Chen B., and Kaufman A. 3D volume rotation using shear transformations // Graphical Models. 2000. V. 62, Is. 4. P. 308–322.
24. Schmitt A., Muller H., and Leister W. Ray Tracing Algorithms – Theory and Practice // Theoretical Foundations of Computer Graphics and CAD. Jan 1988. P. 997–1030.
25. Трассировка лучей [Электронный ресурс]. URL: https://studme.org/156199/informatika/trassirovka_luchey (дата обращения: 20.03.2022).

Статья поступила в редакцию 15.02.2022;
переработанный вариант – 21.03.2022.

Токтошов Гулжигит Ысакович

к.т.н., доцент кафедры ММиЦРБС СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86);
научный сотрудник лаборатории СМиО ИВМиМГ СО РАН (630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6), e-mail: tgi_tok@rambler.ru.

References

1. Kazakov A. L., Lempert A. A. *Ob odnom podhode k resheniju zadach optimizacii, vozni-kajushhih v transportnoj logistike* [On one approach to solving optimization problems arising in transport logistics]. *Avtomatika i telemekhanika*. 2011, no. 7, pp. 50-57.
2. Djebedjian B., El-Naggar M., and Shahin I. Optimal design of gas distribution network: a case study. *Mansoura Engineering Journal (MEJ)*. 2011, vol. 36, no. 3, pp. 35-51.
3. Heidarifar M., and Ghasemi H. A network topology optimization model based on substation and node-breaker modeling. *IEEE Trans. on Power Systems*. 2016, vol. 31, no. 1, pp. 247-255.
4. Li F., Liu Q., Guo X., and Xiao J. A survey of optimization method for oil-gas pipeline network layout. *Proc. International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC)*, April 1-3, 2015, Shenyang, China, pp. 257-260.
5. Edgar T. F., Himmelblau D. M., and Bickel T. C. Optimal design of gas transmission networks. *SPE J*. 1978, no. 18, pp. 96-104.
6. Dong G., Qing T., Du R., Wang C., Li R. et al. Complex network approach for the structural optimization of global crude oil trade system. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 251. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119366> (access date: 19.01.2022).
7. Liong S.-Y., and Atiquzzaman M. Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution. *Journal of The Institution of Engineers (Singapore)*. 2004, vol. 44, is. 1, pp. 93-107.
8. Tricarico S., Gargano R., De Marinis G., Morley M. S., Kapelan Z., Savic D. A. The influence of network topology on water distribution system performance. *Proc. 10th International Conference on Hydroinformatics (HIC)*, 2012, Hamburg, Germany, URL: https://www.researchgate.net/publication/230931471_The_Influence_of_Network_Topology_on_Water_Distribution_System_Performance (access date: 28.01.2022).
9. Lee H. M., Yoo D. G., Sadollah A., and Kim J. H. Optimal cost design of water distribution networks using a decomposition approach. *Engineering Optimization*. 2016, vol. 48, no. 12, pp. 2141-2156. URL: <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1157689> (access date: 03.02.2022).
10. Lebedjancev V. V., Derevjashkin V. M. *Tenzornaja model' seti svjazi* [Tensor model of a communication network]. *Vestnik SibGUTI*. 2014, no. 2, pp. 50-56.
11. Odrin V. M. *Metod morfologicheskogo analiza tehniceskikh system* [Method of morphological analysis of technical systems]. Moscow: VNIPI, 1989, 312 p.

12. Stennikov V. A., Chemezov A. A. *Primenenie algoritma perebora derev'ev i metoda imi-tacii otzhiga dlja shemno-strukturnoj optimizacii teplovyh setej* [Application of tree enumeration algorithm and annealing simulation method for scheme-structural optimization of heat networks]. *Programmnye produkty i sistemy*. 2018, no. 2 (31), pp. 387-395.
13. Naumov I. V., Jamshhikova I. V. *Matematicheskoe obosnovanie vybora optimizacionnoj modeli trassirovki jelektricheskoy seti* [Mathematical substantiation of the choice of an optimization model for tracing an electrical network]. *Evrazijskij Sojuz Uchenyh (ESU)*. 2015, no. 7 (16), pp. 123-127.
14. Stepanov V. P. *Optimizacija marshrutov na dorozhnoj seti* [Route optimization on the road network]. *Nauka i obrazovanie*. 2012, no. 5, pp.1-12.
15. Akimov S. V. *Model' morfologicheskogo mnozhestva urovnja identifikacii* [Model of the morphological set of the level of identification]. *Trudy uchebnyh zavedenij svyazi*. 2005, no. 172, pp. 120-135.
16. Golumbic M. C., Kaplan H., Shamir R. Graph sandwich problems. *Journal of Algorithms*. 1995, no. 19 (3), pp. 449-473. DOI:10.1006/jagm.1995.1047.
17. Pouloussis A., Levene M. A nested-graph model for the representation and manipulation of complex objects. *J. ACM Trans. Inf. Syst.* 1994, vol. 12, pp. 35-68.
18. Orłowski S., Koster A. M. C. A., Raack C., Wessäly R. Two-layer network design by branch-and-cut featuring MIP-based heuristics. Proc. 3rd International Network Optimization Conference (INOC), Spa, Belgium, 2007, pp. 114-119.
19. Capone A., Carello G., Matera R. Multi-layer network design with multicast traffic and statistical multiplexing. Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM), Washington, USA, 2007, pp. 2565-2570.
20. Kurant M., Thiran P. Layered complex networks. *J. Phys. Rev. Lett.* 2006, vol. 96, pp. 1-4.
21. Popkov V. K. *O modelirovanii gorodskih transportnyh sistem gipersetjami* [On the modeling of urban transport systems by hypernets]. *Avtomatika i telemekhanika*. 2011, vol. 72, no. 6, pp. 179-189.
22. Toktoshov G. Y., Jurgenson A. N., Migov D. A. *O slozhnosti zadach optimizacii setej inzhenernyh kommunikacij* [On the complexity of engineering network optimization problems] *T-Comm: Telekommunikacii i transport*. 2020, vol. 14, no. 9, pp. 17-23.
23. Chen B., and Kaufman A. 3D volume rotation using shear transformations. *Graphical Models*. 2000, vol. 62, is. 4, pp. 308-322.
24. Schmitt A., Muller H., and Leister W. Ray Tracing Algorithms - Theory and Practice. *Theoretical Foundations of Computer Graphics and CAD*. Jan 1988, pp. 997-1030.
25. Trassirovka lucej [Ray tracing] [Electronic resource]. URL: https://studme.org/156199/informatika/trassirovka_luchey (access date: 20.03.2022).

The route choosing methodology for networks and communications laying

Gulhzigit Y. Toktoshov

Candidate of technical sciences, Docent, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS), Researcher, The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS (Novosibirsk, Russia), tgi_tok@rambler.ru.

In this paper a new route selecting method for laying engineering communications taking into account the urban development saturation with various infrastructural objects, designed communications type and purpose, communications rotation angles around a given axis when avoiding obstacles, and other restrictions is proposed. The communications laying routes unlike the traditional representation are considered as three-dimensional object in space which has a restriction according both plan and profile. In addition, the communications placement region is considered as a three-dimensional space and is modeled as a three-dimensional computational network. The communications optimization task in the form of minimal hypernet structure with restrictions and requirements imposed on the designed communications is proposed. A modified ray tracing method enabling to choose a path depending on the angular and linear coordinates predetermining the communications position in space is proposed.

Keywords: route, communications, infrastructure, graph, hypernet, 3D transformation.