

Модель улично-дорожной сети на основе скелета

Мехедов И. С.,* Козлов А. В.†

Аннотация

В работе рассматривается подход к построению модели улично-дорожной сети векторной карты на основе скелета многоугольной многосвязной фигуры. Модель представляет собой связный граф, топологически соответствующий конфигурации улично-дорожной сети. Приводится классификация перекрестков на основе топологии графа. Для одноуровневой модели (проезжие части всех дорог пересекаются на одном уровне) дается алгоритм ее построения.

Ключевые слова: модель улично-дорожной сети, скелет, классификация перекрестков, осевая линия улицы.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в некоторых геоинформационных системах и многих интерактивных картах используется модель улично-дорожной сети (УДС). Она предназначена для описания в виде графа схемы автомобильных дорог с целью последующего сетевого анализа (поиск кратчайшего по времени или расстоянию маршрута, поиск кратчайшего обхода заданного набора пунктов, поиск ближайших пунктов обслуживания). Также модель используется при анализе транспортной ситуации: ребрам графа могут быть приписаны различные дорожные характеристики, например, интенсивность движения между перекрестками, количество полос проезжей части и некоторые другие).

В статье рассматривается УДС г. Москвы. В качестве картографических данных УДС используется информация ресурса «Единая государственная картографическая основа г. Москвы» [9] (рис. 1), в котором УДС представляет собой множество многоугольных фигур, географические координаты вершин которых с определенной точностью описывают реальные границы проезжей части.

Такой вид представления пространственных данных позволяет вычислить многие характеристики УДС, например: ширину проезжей части в любой точке, протяженность перегонов между перекрестками, – а также определить область и конфигурацию практически любого перекрестка на карте. Инструментом проведения такого анализа свойств УДС является модель УДС, описываемая в статье.

Под моделью городской УДС будем понимать связный граф, каждой вершине которого сопоставлена пара географических координат, а также некоторым вершинам и ребрам поставлены в соответствие числовые или качественные характеристики. Такой граф при этом должен топологически корректно соответствовать конфигурации УДС.

В том случае, когда все проезжие части улиц пересекаются на одном уровне, говорят об одноуровневой УДС (рис. 1а). Многоугольные фигуры, составляющие УДС, могут быть объединены в одну многоугольную фигуру, граница которой определяет границу всей УДС города. Если же проезжие части могут находиться друг под другом, то речь идет о многоуровневой УДС (рис. 1б). Последняя практически всегда является состав-

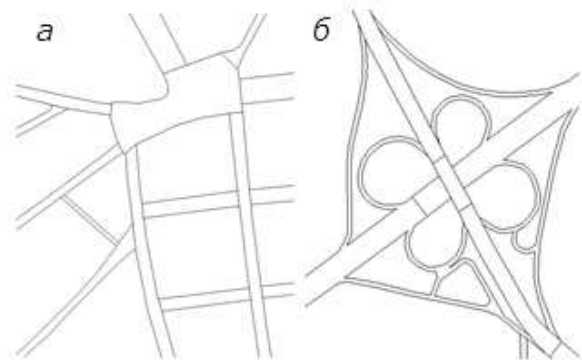


Рисунок 1: Фрагменты улично-дорожной сети Единой Государственной Картографической Основы г. Москвы. Одноуровневая (а) и многоуровневая УДС (б).

ляющей крупного мегаполиса за счет наличия транспортных развязок. В этом случае объединение многоугольных фигур УДС образует некоторую поверхность с границей, задающей границу всей УДС. Заметим, что любая многоуровневая УДС может быть разбита на одноуровневые фрагменты.

Модель многоуровневой УДС является предметом будущих исследований авторов. В настоящей статье рассмотрим построение модели одноуровневой УДС (или одноуровневых фрагментов многоуровневой УДС) – одноуровневой модели – на основе множества многоугольных фигур.

2. ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛИ

Исходными данными является множество многоугольных фигур (*элементов УДС*), любые две из которых не имеют общих точек, за исключением, быть может, общего участка границы. Требуется построить модель УДС в виде связного плоского графа, обладающего следующими свойствами:

1. граф должен топологически корректно соответствовать конфигурации УДС;
2. должно существовать *адекватное* сюръективное отображение множества вершин графа на множество перекрестков УДС;
3. должно существовать *инъективное* отображение множества *простых цепочек* графа (т. е. цепей графа, все внутренние вершины которых имеют степень 2, а концевые вершины – степень, отличную от 2) на множество участков УДС между перекрестками;
4. граф должен служить инструментом анализа некоторых характеристик УДС (о них уже было упомянуто выше).

Элементы одноуровневой УДС могут быть объединены в сложную многосвязную многоугольную фигуру. Математической моделью, наиболее точно описывающей топологию такой фигуры, является *скелет*, т.е. множество всех центров максимальных пустых кругов фигуры [2], поэтому в статье рассматривается метод построения модели УДС на основе скелета.

*Вычислительный центр РАН, e-mail: mehedov@mail.ru

†ООО «Лаборатория транспортных систем», e-mail: kav57@inbox.ru

Переход к линейной модели от совокупности площадных объектов является известной задачей геоинформатики. В известных работах по этой тематике также используется скелет многоугольной фигуры. Так, в [6, 7] линейная модель УДС строится на основе *спрямленного скелета (straight skeleton)*, подробно описанного в [5]. Недостатками такого скелета является неопределенность *радиальной функции* точки скелета, т.е. величину радиуса пустого круга с центром в этой точке [2]. В [8] используется скелет на основе *диаграммы Вороного* [2], но он плохо применим к сложным многоугольным фигурам с большим количеством «дыр». Вообще, большинство известных алгоритмов скелетизации хорошо работают с простыми многоугольниками, но либо «боятся» многосвязных многоугольных фигур, либо имеют большую вычислительную сложность.

Для построения модели будем использовать алгоритм скелетизации, предложенный в [3], применимый к произвольным многоугольным фигурам и имеющий сложность $N \log N$ (N — число вершин фигуры).

Основой модели служит не весь скелет, а его подграф, устойчивый к граничным шумам (незначительным «неровностям» границы) — *базовый скелет* [4]. Базовый скелет может быть получен путем итерационной стрижки тупиковых ветвей скелета [2] (рис.2а). Он обладает свойствами (1), (3) и (4) модели.

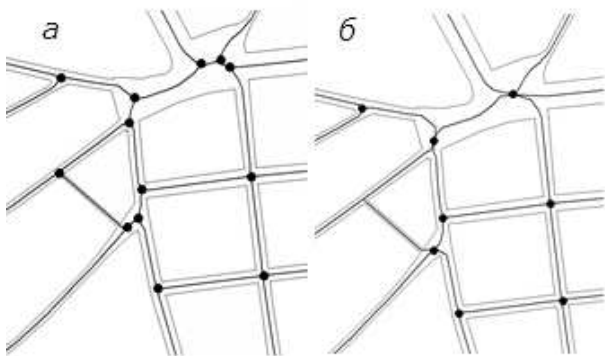


Рисунок 2: Базовый скелет фрагмента УДС (а) и модель фрагмента УДС (б). Точками отмечены вершины графа степени более двух.

Свойство (2) связано с нестрогим определенным понятием «адекватное сюръективное отображение». Это означает, что модель должна быть таковой, чтобы разветвления скелета соответствовали разветвлениям дорог, т.е. перекресткам соответствовали вершины скелета степени более двух. Для этого необходимо произвести некоторые операции над базовым скелетом, приводящие его к соответствующему виду. Эти операции тесно связаны с классификацией перекрестков на основе скелетной модели УДС, о чем будет подробно рассказано в следующем разделе.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРЕКРЕСТКОВ НА ОСНОВЕ СКЕЛЕТА

Разделим все перекрестки на две большие группы — одноуровневые и многоуровневые (развязки). В группе одноуровневых перекрестков (именно они рассматриваются в одноуровневой модели) выделим три подгруппы: простые, сложные и комбинированные. К простым перекресткам относятся: Т-образный перекресток (рис.3а вверху), крестообразный перекресток (рис.3а внизу), площадь (рис.3б). К сложным перекресткам относятся: сложный Т-образный (рис.3в), сложный

крестообразный (рис.3г) и сложная площадь (рис.3д). Среди комбинированных перекрестков будем по аналогии различать комбинированные Т-образный (рис.3е), комбинированный крестообразный (рис.3ж), комбинированную площадь (рис.3з).

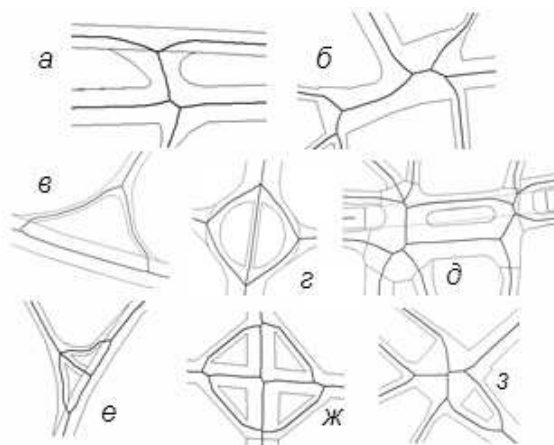


Рисунок 3: Типы одноуровневых перекрестков.

Будем строить сюръективное отображение множества вершин модели на множество перекрестков УДС. Введем три определения.

Будем говорить, что *перекресток H_P является образом вершины P модели УДС*, если H_P соответствует связный подграф модели УДС, содержащий P и не содержащий других вершин степени более двух.

Будем говорить, что *перекресток H_C является образом цикла C модели УДС*, если H_C соответствует связный подграф модели УДС, содержащий C и не содержащий вершин степени более двух, не принадлежащих C , а также не содержащий других циклов, за исключением, быть может, внутри C .

Будем говорить, что *перекресток H_{P_C} является образом «вершины с циклами» P_C модели УДС*, если H_{P_C} соответствует связный подграф модели УДС, содержащий P_C , входящую в состав одного или нескольких циклов C_1, C_2, \dots, C_N , и не содержащий вершин степени более двух, не принадлежащих C_1, C_2, \dots, C_N .

После объединения близких вершин базового скелета (рис.4, рис.2б), мы получим модель, в которой:

- простые перекрестки являются образами вершин модели степени более двух, причем Т-образный перекресток является образом вершины степени 3, крестообразный — вершины степени 4, площадь — вершиной степени 5 и более;
- сложные перекрестки являются образами циклов модели, содержащих по крайней мере две вершины степени более 2, причем сложный Т-образный перекресток является образом цикла, содержащего три вершины степени более 2, и остальные вершины, если они есть, степени 2; сложный крестообразный перекресток — четырьмя вершинами степени более 2; площадь — пятью или более вершинами степени 3, либо содержащим по крайней мере одну вершину степени более 3;
- комбинированные перекрестки являются образами «вершин с циклами» степени более 3, причем комбинированный Т-образный перекресток является образом «вершин

ны с циклами» степени 3, комбинированный крестообразный — «вершиной с циклами» степени 4, комбинированная площадь — «вершиной с циклами» степени 5 или более.

Таким образом, мы определили адекватную сюръекцию множества вершин графа на множество перекрестков (свойство (2)). Модель УДС, к множеству вершин которой применима данная сюръекция, является результатом операции объединения близких вершин базового скелета. В модели можно выделить несколько типов неизоморфных подграфов — *шаблонов перекрестков*. Каждый шаблон характеризуется степенью порождающей вершины и (или) наличием и числом циклов.

Понятие адекватности сюръекции имеет тот смысл, что мы определяем не произвольное отображение одного множества на другое, а закладываем в него интуитивно-понятное соответствие топологии УДС и графа (например, простому перекрестку должна соответствовать одна вершина скелета степени более 2, причем степень соответствует количеству пересекающихся проезжих частей).

Сюръекцию можно определить и по-другому. В ряде случаев удобно использовать модель, в которой детализация организации движения на перекрестке не важна, а важен лишь сам факт наличия перекрестка. В этом случае должно существовать взаимно-однозначное соответствие между множеством перекрестков и множеством вершин скелета степени более двух. Такую модель УДС назовем *макромоделью*.

В следующем разделе подробно опишем все операции над базовым скелетом, а именно: *объединение близких вершин, замена цикла вершиной, изъятие цикла*, — приводящие к модели и макромодели УДС.

4. ОПЕРАЦИИ НАД БАЗОВЫМ СКЕЛЕТОМ, ПРИВОДЯЩИЕ К МОДЕЛИ И МАКРОМОДЕЛИ УДС

Объединение близких вершин. Участки УДС, соответствующие перегонам между перекрестками имеют протяженность большую, чем ширину. В области перекрестков же, напротив, ширина УДС сравнима с длиной. На основе этого сформулируем понятие топологической близости вершин для решаемой задачи: две вершины скелета степени более 2 являются *топологически близкими* в задаче построения модели УДС, если максимальные пустые круги скелета с центрами в этих вершинах пересекаются (рис.4).

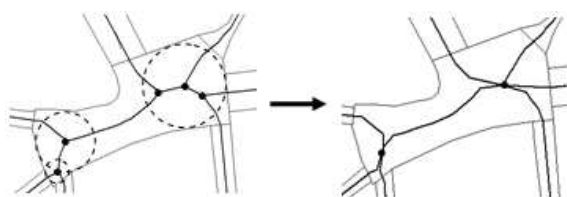


Рисунок 4: Объединение близких вершин.

Такое понятие близости вершин, основанное на топологии скелета, формирует задачу *кластеризации вершин скелета на основе радиальной функции*.

Алгоритм объединения вершин скелета можно найти в [1].

Из-за наличия «дыр» в многоугольной фигуре, описывающей УДС, в модели присутствуют циклы, являющиеся прообразами сложных перекрестков, и содержащие «вершины с циклами», являющиеся прообразами комбинированных перекрестков.

Для построения макромодели УДС, необходимо произвести операции замены цикла вершиной и удаления циклов.

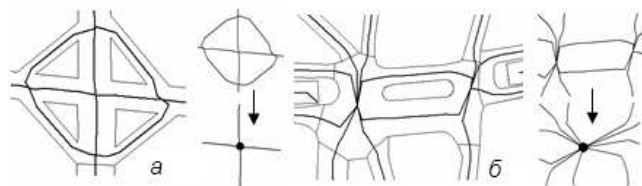


Рисунок 5: Изъятие циклов (а) и замена цикла вершиной (б).

Замена цикла вершиной. Пусть H_C — одноименный сложный перекресток — образ цикла C . Заменой цикла на вершину P_C будем считать удаление всех вершин из базового скелета, входящих в C , введение в полученный граф новой вершины в геометрическом центре цикла и соединение ее с соответствующими висячими ребрами графа (рис.5б). Новая вершина макромодели в данном случае соответствует прообразу простого перекрестка обычной модели УДС того же типа, что и сложный.

Изъятие циклов. Пусть H_{P_C} — комбинированный перекресток — прообраз «вершины с циклами» P_C . Изъятием цикла будем считать удаление всех простых цепочек, не содержащих P_C (рис.5а). Вершина P_C полученной макромодели после такого преобразования соответствует прообразу простого перекрестка обычной модели УДС того же типа, что и комбинированный.

5. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Вычислительный эксперимент построения модели УДС был проведен с помощью ГИС-компонента Mapprl [10]. Программный модуль осуществлял автоматическое построение одноуровневой модели фрагментов УДС и выделение перекрестков УДС на основе модели. Для эксперимента были отобраны некоторые сложные одноуровневые фрагменты УДС г. Москвы. На рис.6 изображена построенная модель для участка УДС «Серпуховская площадь и прилегающие улицы» (без тоннеля), а на рис.7 — выделенные перекрестки.

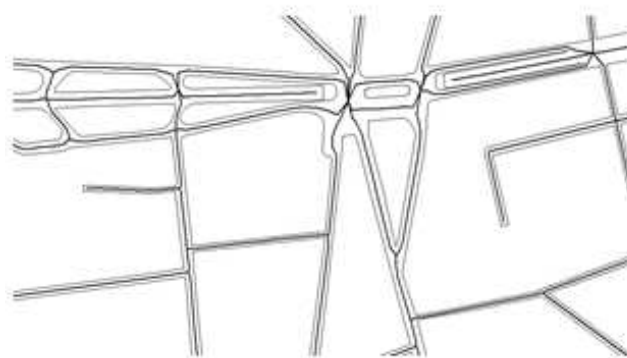


Рисунок 6: Вычислительный эксперимент. Одноуровневая модель фрагмента УДС «Серпуховская площадь и прилегающие улицы» (без тоннеля).

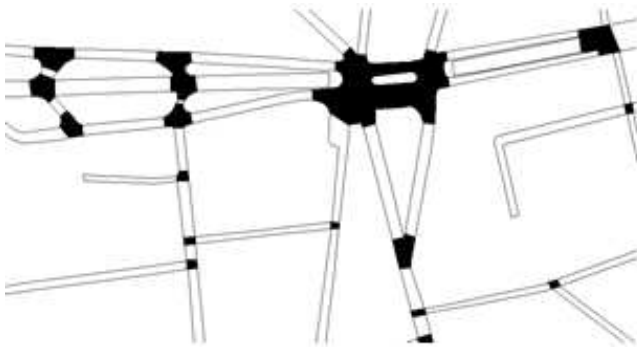


Рисунок 7: Вычислительный эксперимент. Перекрестки, выделенные во фрагменте УДС «Серпуховская площадь и прилегающие улицы» (без тоннеля).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описана одноуровневая модель дорожной сети на основе скелета многоугольной фигуры. Дана классификация одноуровневых перекрестков на основе топологии модели. Рассмотрены операции над базовым скелетом, приводящие к появлению шаблонов перекрестков в модели и макромодели УДС. Каждый шаблон перекрестка является подграфом модели определенной структуры, причем все шаблоны попарно неизоморфны. Также авторами предложен критерий топологической близости вершин скелета, хорошо применимый к рассматриваемой задаче.

Модель УДС позволяет проводить более детальную классификацию перекрестков и среди изоморфных шаблонов. Так, на (рис.8) слева изображен перекресток с круговым движением, а справа — сложный Т-образный перекресток. Перекрестки имеют изоморфные шаблоны типа «сложный Т-образный перекресток», однако разную геометрическую конфигурацию циклов. Эта задача требует более тонкого анализа геометрии скелета и является предметом будущих исследований.

Также в дальнейшем планируется анализ топологии многоуровневых перекрестков (развязок), а также определение и построения многоуровневой модели УДС.

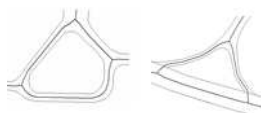


Рисунок 8: Перекресток с круговым движением и сложный Т-образный перекресток: сравнение линейных моделей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 08-01-00670.

АВТОРЫ

Иван Мехедов — аспирант ВЦ РАН.
email: mehedov@mail.ru.

Андрей Козлов — руководитель ООО «Лаборатория транспортных систем».
email: kav57@inbox.ru.

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Домахина Л. Г., Охлопков А. Д. Изоморфные скелеты растровых изображений. Труды 18-й международной конференции Графикон-2008, Москва.
- [2] Местецкий Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
- [3] Местецкий Л. М. Скелетизация многосвязной многоугольной фигуры на основе дерева смежности ее границы. Сибирский журнал вычислительной математики. — 2006. - Т.9, № 3. - С. 299-314.
- [4] Местецкий Л. М., Рейер И. А. Непрерывное скелетное представление изображения с контролируемой точностью. Труды 13-й международной конференции Графикон-2003, Москва.
- [5] Aichholzer O., Aurenhammer F. Straight Skeletons for General Polygonal Figures in the Plane. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 1090. Springer-Verlag (1996), 117-126.
- [6] Haunert J.-H., M. Sester M. Area Collapse and Road Centerlines based on Straight Skeletons. Geoinformatica, Vol.12 e2 (2008), 169-191.
- [7] Haunert J.-H., Sester M.. Using the Straight Skeleton for Generalization in Multiple Representation Environment. ICA Workshop on Generalization and Multiple Representation, 2004.
- [8] Roberts S. A., Brent Hall G., Boots B. Street Centerlines Generation With an Approximated Area Voronoi Diagram. In Fisher P. F. (Ed.), Developments in spatial data handling: 11th International Symposium on Spatial Data Handling. Springer-Verlag (2004), 435-446.
- [9] www.egko.ru
- [10] www.mappl.ru

ABSTRACT

An approach to the construction of vector map road network model is considered. The model based on a skeleton of polygonal multiconnected domain is a connected graph topologically identical to road network configuration. Based on graph topology, the classification of crossroads is shown. The algorithm of single-level model (all pavements cross at one level) is given.

Keywords: road network, skeleton, road centerline, crossroad classification.