# АВТОМАТИЧЕСКОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

И.И. Абдулганиев, А.А. Агафонов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Работа посвящена решению задачи автоматического тестирования модели транспортной сети крупного населённого пункта. Под тестированием понимается проверка связанности вершин дорожной сети и правильности расстановки поворотов. Рассмотрен базовый алгоритм тестирования на основе оптимального расстояния. Предложен оригинальный алгоритм тестирования на основе проверки направленности движения, проведено его сравнение с базовым алгоритмом. Проведены экспериментальные исследования эффективности предложенных алгоритмов на примере транспортной сети города Самары.

**Ключевые слова:** транспортная сеть, тестирование топологии, кратчайший путь, направленность движения.

## Введение

Геоинформационные системы используются во многих областях нашей жизни, включая муниципальное управление, транспортные системы, экономику и т.д. С увеличением интенсивности использования пространственных данных всё более важным становится вопрос об их качестве. В данном контексте под качеством понимается полнота и точность данных.

Модель транспортной сети (ТС) является основой для решения многих транспортных задач, таких как оптимальное планирование сетей, улучшение организации движения, оптимизация системы маршрутов общественного транспорта и т.д. В работе рассматривается одна из возможных постановок задачи тестирования дорожной сети, заключающаяся в проверке геометрии сегментов дорожной сети и правильности расстановки поворотов. Решение этой задачи необходимо для дальнейшего использования ТС в более сложных задачах, таких как расчёт кратчайшего расстояния в зависящих от времени сетях, оценка времени прибытия общественного транспорта, прогнозирование транспортных потоков.

Решение задачи проверки графа является одним их этапов формирования модели транспортной сети по имеющимся спутниковым изображениям [1,2,3]. Дорожные сети, автоматически формируемые по цифровым изображениям, часто являются неполными и фрагментарными. Это проблема особенно актуальна при использовании изображений с низким разрешением. Работа проверки сетей осуществляется в основном вручную оператором, который сравнивает векторные данные с исходными изображениями.

В статье [1] предложен подход для дополнения фрагментированных дорожных сетей с помощью проверки гипотез о связи точек сети на основе характеристик сети: проверялся «Коэффициент объезда», учитывающий расстояние по дорожной сети и оптимальное (Евклидово) расстояние между точками. В [2] для поиска отсутствующих сегментов сети также применяется алгоритм поиска кратчайшего пути в графе А*.

В данной работе используется усложнённый граф сети, учитывающий разрешённые / запрещённые повороты. Предложен новый алгоритм проверки транспортной сети на основе проверки направленности движения и проведено его сравнение с описанным в [1] алгоритмом на основе «коэффициента объезда».

Работа построена следующим образом. В первом разделе вводятся основные понятия, описывается структура графа ТС, даётся постановка задачи. Второй и третий разделы посвящены описанию предлагаемых алгоритмов тестирования. В четвёртом разделе приводятся экспериментальные исследования разработанных алгоритмов. В завершении работы приводятся выводы, даётся список используемой литературы.

## 1. Основные обозначения и постановка задачи

Транспортную сеть определим как ориентированный граф:

$$G = (V, E),$$

где $V$ – непустое множество вершин, представляющее собой разделяющие участки дорог узлы, $E$ – множество дуг, которые соответствуют реальным участкам дорог (сегментам дорожной сети). Направление дуги определяет направления движения транспортного средства на соответствующем участке сети.

Будем считать, что граф имеет пространственную привязку, т.е. каждая вершина графа имеет координаты $(x, y)$, которые определяются по физическому расположению соответствующего узла в реальной дорожной сети.

*Структура графа транспортной сети*

В работе используется ориентированный связный граф, каждое ребро которого имеет две весовых характеристики:

– $t$ – время передвижения по ребру.

– $l$ – длина соответствующего ребра.

Каждый перекрёсток превращается в совокупность геометрически совпадающих вершин графа. Для каждого сегмента дорожной сети предназначены две вершины: одна для исходящего ребра, одна для входящего, соответствующих направленному движению по правой и левой полосе дороги. Каждый сегмент дорожной сети превращается в два ребра графа между парами исходящих и входящих вершин, относящихся к разным перекрёсткам и предназначенным для данного сегмента. Внутри перекрёстка строятся рёбра, означающие возможность проезда на смежные сегменты дорог. Между запрещёнными для перехода сегментами рёбра не ставятся, соответственно, исключается возможность построить в графе нарушающий правила маршрут. Внутренние рёбра не имеют геометрической характеристики, их весовая характеристика задаётся по усреднённому времени преодоления перекрёстка с поворотом или прямым движением, которое получалось бы для нерегулируемого перекрёстка.

На рисунке 1 приведена схема перекрёстка с возможностью движения в любом направлении.

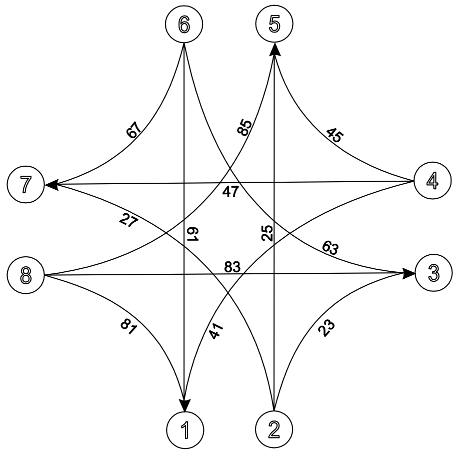


**Рис.1.** Структура графа внутри перекрёстка

Формальная постановка задачи тестирования модели транспортной сети может быть задана следующим образом:

*разработать и программно реализовать алгоритмы тестирования модели транспортной сети крупного населённого пункта.*

Под тестированием понимаем проверку связанности вершин дорожной сети и правильности расстановки поворотов. В следующих разделах представлены алгоритмы проверки гипотез о связанности вершин дорожной сети на основе оптимального расстояния и направленности движения.

## 2. Гипотеза на основе оптимального расстояния

В работе [1] для проверки гипотезы о связи сегментов сети вводится «коэффициент объезда».

Введём следующие обозначения:

$\sigma_{ks}$ – кратчайшее расстояние между вершинами k и s. Кратчайшее расстояние определяется с помощью алгоритма Дейкстры [4].

$\rho_{ks}$ – Евклидово расстояние между вершинами k и s.

$\theta_{dc} = \frac{\sigma_{ks}}{\rho_{ks}}$ - коэффициент объезда.

Коэффициент объезда показывает, насколько расстояние между двумя вершинами при движении в транспортной сети больше оптимального (Евклидового) расстояния между этими вершинами.

Для всех вершин графа, участвующих в тестировании мы высчитываем соответствующие расстояния. Критерием проверки является выражение:

$$\theta_{dc} > \theta_{dc}^{\max}, \qquad (1)$$

где $\theta_{dc}^{\max}$ – определяемый заранее пороговый коэффициент.

Если критерий (1) выполняется, то все сегменты дорожной сети, входящие в кратчайший путь между двумя вершинами – кандидаты на проверку, для их анализа нужны дополнительные исследования. Возможно на данном пути есть неправильно расставленные повороты или нарушена геометрия сети.

Исследования влияния порогового коэффициента на результаты тестирования представлены в разделе 4.

## 3. Гипотеза на основе направленности движения

Описанный в разделе 2 базовый алгоритм имеет недостаток: если вершины сильно удалены друг от друга, то $\sigma_{ks}$ и $\rho_{ks}$ будут почти совпадать, даже при условии, что связность сегментов ТС была нарушена. В данном разделе приведён новый алгоритм тестирования ТС, который устраняет этот недостаток.

Введём дополнительные обозначения:

$d_{ks} = \{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ – кратчайший путь из вершины k в s, где

$v_i, i = \overline{0, N-1}$ – вершина ТС, входящая в кратчайший путь под номером i.

$N$ – число вершин ТС, входящих в кратчайший путь.

Для двух фиксированных вершин k и s, строится кратчайший путь $d_{ks}$. Затем для каждой $v_i$, входящей в $d_{ks}$, высчитывается $\rho_{v_i s}$.

Введём в рассмотрение коэффициент направленности движения:

$$\beta_i = \frac{\rho_{v_{i+1}s}}{\rho_{v_i s}}, v_i \in d_{ks}, i = \overline{0, N-2}$$

Критерий проверки будет выглядеть следующим образом:

$$\exists i : \beta_i > 1, i = \overline{0, N-2}. \qquad (2)$$

Если критерий (2) выполняется, то данный кратчайший путь – кандидат на проверку. Фактически данный критерий означает, что по мере нашего приближения к пункту назначения (если геометрия ТС не нарушена) Евклидово расстояние до конечной вершины должно уменьшаться.

Однако такое задание критерия имеет недостаток: критерий будет срабатывать, даже если во время движения по кратчайшему пути произойдёт небольшое отдаление от конечной вершины. Мы можем уменьшить количество ложных срабатываний критерия путём ввода порогового коэффициента $\beta^{\max}$. Тогда критерий проверки будет выглядеть следующим образом:

$$\exists i : \beta_i > \beta^{\max}, i = \overline{0, N-2}. \qquad (3)$$

Фактически коэффициент $\beta^{\max}$ означает допущение некоторой погрешности при составлении кратчайшего пути. Однако, стоит отметить, что слишком большое значение коэффициента $\beta^{\max}$ приведёт к уменьшению количества верных срабатываний гипотезы.

В следующем разделе приведены экспериментальные исследования представленных алгоритмов.

## 4. Экспериментальные исследования

Цели проводимых экспериментальных исследований:

<u>Эксперимент 1.</u> Оценка влияния порогового коэффициента $\theta_{dc}^{\max}$ на результаты тестирования алгоритма, основанного на сопоставлении с Евклидовым расстоянием.

<u>Эксперимент 2.</u> Исследование эффективности алгоритма тестирования на основе проверки направленности движения.

Исследования разработанных алгоритмов проводились на транспортной сети г. Самары. Транспортная сеть состоит из 52175 вершин, 76636 рёбер. Для экспериментальных исследований из графа ТС было искусственно удалено 400 рёбер, обозначим их $e_1, e_2, ..., e_{400}$.

Ниже представлены результаты экспериментов.

Эксперимент 1. Влияние порогового коэффициента на результаты тестирования

Для тестирования были выбраны 10 начальных $(k_1, k_2, ..., k_{10})$ и 10 конечных $(s_1, s_2, ..., s_{10})$ вершин ТС, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. Были выбраны следующие значения пороговых коэффициентов:

$$\theta_{dc}^{\max} = \{1{,}08; 1{,}15; 1{,}2; 1{,}3; 1{,}35; 1{,}4\}.$$

В 1 части эксперимента было проведено тестирование с графом Самары без удалённых рёбер. Для каждой пары точек *k, s* высчитываются кратчайший путь $d_{ks}$.

Во 2 части исследования тестирование проводится с изменённым графом, в котором удалены некоторые рёбра. Для каждой пары точек высчитываются кратчайшее расстояние $\sigma_{ks}$ Евклидово расстояние $\rho_{ks}$, коэффициент объезда $\theta_{ks}$.

Если кратчайший путь в исходном графе содержит рёбра $e_1, e_2, ..., e_{400}$, считаем, что для всех коэффициентов $\theta_{ks} > \theta_{dc}^{\max}$ эти удалённые рёбра были найдены, т.е. гипотеза сработала верно.

Если кратчайший путь для исходного и изменённого графа совпадает, считаем, что для всех коэффициентов $\theta_{dc}^{\max} < \theta_{ks}$ тестирование произошло с ошибкой (гипотеза сработала ошибочно).

Количество найденных рёбер и ошибок, в зависимости от параметра $\theta_{dc}^{\max}$ представлено на рисунке 2.

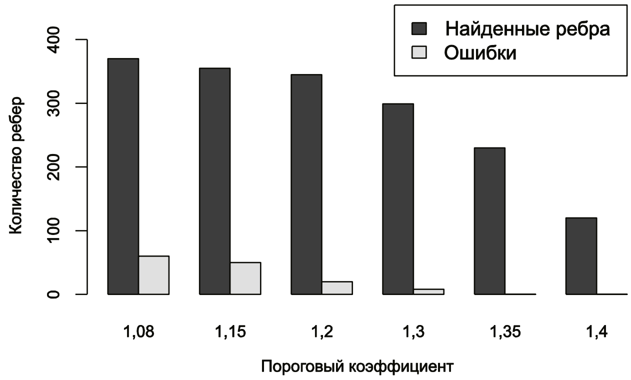


**Рис.2.** Результаты 1 эксперимента

Выбор соответствующего значения порогового коэффициента $\theta_{dc}^{\max}$ зависит от допустимого уровня ложных срабатываний алгоритма. Если важно увеличить количество верных срабатываний гипотезы, невзирая на количество ложных срабатываний, параметр $\theta_{dc}^{\max}$ стоит выбирать небольшим – 1,08-1,2. Если же критично количество ложных срабатываний, то $\theta_{dc}^{\max}$ стоит задать в пределах 1,35-1,4.

В среднем случае $\theta_{dc}^{\max}$ задаётся в пределах 1,2-1,35. Для данных пороговых коэффициентов количество верно определённых нарушений геометрии ТС составляет порядка 75-85%, ошибочно определённых – 4-6%.

Эксперимент 2. Исследование эффективности критерия направленности движения

Исследование алгоритма, основанного на проверке направленности движения, проводились на том же графе.

В 1 части исследования было проведено тестирование с графом Самары без удалённых рёбер. Для каждой пары точек *k*, *s* строится кратчайший путь и записывается массив вершин, входящих в это расстояние $d_{ks}$.

Во 2 части исследования проводится тестирование с изменённым графом, в котором удалены некоторые рёбра. Для каждой пары точек *k*, *s* аналогично строится кратчайший путь и записывается массив вершин $d_{ks}^{'}$.

Если во 2 части исследования критерий (2) выполняется и кратчайший путь в исходном графе содержит рёбра $e_1, e_2, ..., e_{400}$, то эти рёбра считаются найденными. Если же кратчайший путь не содержит рёбра $e_1, e_2, ..., e_{400}$, то считается, что тестирование произошло с ошибкой. Результаты проведённых исследований приведены в таблице 1.

**Табл. 1.** Результаты 2 эксперимента

| Удалено рёбер | Найдено | Ложное срабатывание |
|---|---|---|
| 400 | 354 | 22 |

По результатам исследования можно сказать, что данный алгоритм показал схожие результаты с алгоритмом, основанном на сравнении с Евклидовым расстоянием с пороговым коэффициентом 1,2. Количество верно определённых нарушений геометрии ТС составляет 88%, ошибочно определённых – 5,5%.

## Заключение

В работе предложен новый оригинальный алгоритм тестирования ТС крупного населённого пункта, основанный на проверке направленности движения. Под тестированием понимается проверка связанности вершин дорожной сети и правильности расстановки поворотов. Проведено сравнение данного алгоритма с базовым (на основе оптимального расстояния) на данных транспортной сети г. Самары. Также проведено исследование влияния порогового коэффициента на результат тестирования базового алгоритма.

По результатам исследований можно сказать, что базовый алгоритм показал высокую зависимость полученных результатов от порогового коэффициента. Благодаря этому, пользователь, в зависимости от целей тестирования, может выбрать соответствующее значение коэффициента.

Разработанный алгоритм показал схожие результаты с базовым алгоритмом при пороговом коэффициенте 1,2. Стоит отметить, что предложенный алгоритм обладает свойством, которое не присуще базовому алгоритму, а именно: показывает высокие результаты, даже если вершины сильно удалены друг от друга.

Предложен вариант модификации разработанного алгоритма путём ввода дополнительного порогового коэффициента. Зависимость результатов тестирования от введённого коэффициента можно рассматривать как дальнейшее развитие работы.

## Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 16-37-00055-мол_а.

## Литература

1. Wiedemann, C. Automatic Completion and Evaluation of Road Networks / C. Wiedemann, H. Ebner // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2000. – Vol. XXXIII, Part B3. – P. 979-986.
2. Gerke, M. Graph Supported Automated Verification of Road Databases Using Aerial Imagery / M. Gerke, M. Butenuth, C. Heipke, F. Willrich // Proc. 2nd International Symposium on Spatial Data Quality. – 2003. – P. 421-430.
3. Grote, A. Road Network Extraction in Suburban Areas / A. Grote, C. Heipke, F. Rottensteiner // Photogrammetric Record. – 2012. – Vol. 27 (137). – P. 8-28.
4. Dijkstra, E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numer. Math – Springer Science+Business Media. – 1959. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 269 – 271.