

На правах рукописи

Головков Александр Александрович

**АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ГЕОДАННЫХ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Иванова Галина Сергеевна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Компьютерные системы и сети» МГТУ им. Н.Э Баумана

Официальные оппоненты: **Сазонова Татьяна Владимировна**, доктор технических наук, главный конструктор открытого акционерного общества «Раменское Приборостроительное Конструкторское Бюро»

Пошехонов Василий Ильич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон») ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Зашита диссертации состоится «2» октября 2018 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высыпать по адресу 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Муратов Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время для мониторинга перемещений, согласования действий полевых сотрудников, ремонтных бригад и аварийных групп в сферах технического обслуживания и ремонта, а также управления беспилотной техникой активно используются геоинформационные системы (ГИС), осуществляющие сбор, обработку и хранение геоданных о маршрутах движения, поступающих с мобильных устройств. Учитывая необходимость снижения нагрузки на сервер, уменьшения количества передаваемых данных и получения геоданных в реальном времени, в современных ГИС основная обработка геоданных обычно выполняется мобильными устройствами.



Рисунок 1. Геоинформационная система

К ГИС как правило предъявляются высокие требования по точности геопозиционирования для принятия решений по формированию маршрутов, оперативному реагированию на различные критичные ситуации. Однако в лучших существующих системах отклонение пройденного расстояния от реального составляет десятки километров (например, 27.9 ± 23.6 км, у Fused технологии геолокации в операционной системе Android), что недостаточно для обеспечения эффективности полевых работ в реальном времени и управления перечисленными выше мобильными объектами.

В работе предлагается разработать алгоритм фильтрации для увеличения точности геопозиционирования за счет использования каскадной схемы обработки геоданных, учитывающей не только данные стандартных API (англ. Application Programming Interface) геолокации мобильных устройств, но и предобработанные NMEA (англ. National Marine Electronics Association) данные, а также информацию со встроенных в устройство сенсоров. Реализация алгоритма обработки тесно связана со многими особенностями: выбором лучшего источника данных из доступных, обработкой геоданных в реальном времени, обеспечением малого времени отклика системы, геопозиционированием в помещениях и вблизи высотных зданий, корректным определением стоянок

сотрудников, координат с нулевой или близкой к нулю скоростью.

Обозначенные особенности составляют далеко не все множество задач, с которыми сталкиваются исследователи и инженеры при проектировании и реализации геоинформационных систем. Проблемами разработки методов фильтрации геоданных занимались многие ученые. Среди них можно назвать Sahai A., Mann W., Enge P., Harle R., Сонькина Д.М., Павловского В.Е., Ворошилина Е.П., Алешечкина А.М., Прохорцова А.В., Пудловского В.Б., Садковского Б.П., Садковскую Н.Е., Салычева О.С., Романова А.Ю., Гаврилова А.В. и многих других. Однако в основном они занимались частными случаями геопозиционирования, когда в расчет брался только один источник данных и не занимались вопросами разработки методов фильтрации геоданных на мобильных устройствах в реальном времени. Многие существующие алгоритмы фильтрации основаны на привязке к картам дорог или тепловым картам движения, однако в условиях отсутствия карт на каком-либо участке местности, навигации внутри помещений или движения пешком такой подход неприменим. В связи с этим проблема фильтрации геоданных в мобильных устройствах в реальном времени и построения результирующего трека с высокой степенью соответствия реальному маршруту движения остается актуальной на настоящий момент.

Объектом исследования настоящей работы является система обработки информации для управления сравнительно медленно движущимися объектами (мобильными сотрудниками, автомобилями, беспилотными летательными аппаратами) в реальном времени. Предмет исследования – трек, строящийся геокоординатам с мобильных устройств, размещенных на движущихся объектах.

Цель работы – разработка алгоритма фильтрации геоданных для увеличения степени соответствия трека реальному маршруту движения.

Задачи работы:

- 1) анализ архитектур геоинформационных систем (ГИС), процесса обработки геоданных, стратегии разделения ответственности за обработку информации, источников геоинформации в мобильных устройствах;
- 2) анализ треков, строящихся в реальном времени по геокоординатам от различных источников, выявление причин и характера отклонений треков от реальных маршрутов движения;
- 3) анализ существующих моделей и методов улучшения качества треков, выявление их преимуществ и недостатков;
- 4) разработка модели описания входных и выходных данных на основе детального анализа геоинформации от разных источников;
- 5) разработка метода фильтрации потока геоданных, исследование различных типов «выбросов» геокоординат и получение расчетных соотношений для их исключения;
- 6) разработка алгоритма последовательной обработки потока геоданных, ориентированного на мобильные операционные системы, с целью исключения «выбросов», уменьшения плотности точек и сглаживания получаемого трека; разработки набора параметров и характеристик оценки эффективности и качества фильтрации, а также расчетных соотношений для их определения;
- 7) разработка подсистемы фильтрации на основе предложенного алгоритма,

критериев оценки его эффективности и качества, экспериментальная проверка полученных результатов.

Методы исследования. В работе использованы методы декомпозиции, формализации, определения общей цели в рамках постановки задачи увеличения степени соответствия трека реальному маршруту движения, статистический и сравнительный анализ геоданных, в том числе регрессионный и кластерный анализ; методы анализа эффективности алгоритмов, оценки достоверности классификаторов и качества работы модели.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) разработана формальная постановка задачи увеличения степени соответствия трека реальному маршруту движения, что позволило систематизировать исходные данные и выбрать пути решения;
- 2) классифицированы случаи отклонений трека от реального маршрута движения для разных источников, определены признаки отклонений, что позволило сформулировать расчетные соотношения для фильтрации геоданных;
- 3) построена модель входных и выходных геоданных, ориентированная на мобильные операционные системы, что позволило учитывать разнородные источники геоинформации, по мере возможности дополняя отсутствующие данные на основе имеющихся;
- 4) разработаны методы фильтрации потока геокоординат, обеспечивающие высокую степень точности и низкую плотность точек трека;
- 5) разработан алгоритм фильтрации, который позволяет получать треки в реальном времени с достоверностью 99.2 %, точностью 99.8 % и полнотой 97.7 % на мобильных устройствах;
- 6) разработан набор критериев оценки качества фильтрации и расчетные соотношения для их определения.

Практическая ценность заключается в создании подсистемы фильтрации геоданных, ориентированной на мобильные устройства. В сравнении с существующими системами среднее отклонение пройденного расстояния от реального уменьшилось примерно в 30 раз.

Достоверность результатов работы подтверждается адекватностью используемых моделей и разработанных методов, корректностью математических преобразований и статистически достоверными результатами проведенных экспериментов.

Внедрение результатов работы. Результаты работы в виде моделей, методов, методик, алгоритмов, аналитических и программных средств были использованы в ряде разработок ГК СДС, в частности в коммерческом решении ОПТИМУМ ГИС, которое успешно эксплуатируется сотрудниками ГК СНС. За счет отслеживания координат сотрудников в реальном времени решение позволяет оперативно осуществлять мониторинг перемещений курьеров в сферах логистики. Подсистема фильтрации также используется в коммерческом продукте ОПТИМУМ ММС, ключевой особенностью которого является быстрое формирование маршрутов сервисных инженеров и ремонтных бригад, оперативная координация их действий и реагирование на критические ситуации в областях технического обслуживания и ремонта различных технических объектов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на:

- 1) III Международной научно-практической конференции «Научные исследования в области технических наук» (Саратов, 2018);
- 2) Международной научной конференции «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники» (Рим, 2018);
- 3) Международном научном конгрессе «Наука и инженерное образование» SEE-2016 (Москва, 2016).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы отражены в 6 статьях, 4 из которых – в научных журналах из перечня ВАК РФ.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) модель описания входных и выходных геоданных, ориентированная на мобильные операционные системы, учитывающая разнородные источники геоинформации; расчетные соотношения для предобработки геоданных;
- 2) метод фильтрации потока геоданных в реальном времени, обеспечивающий высокую степень точности и низкую плотность точек трека;
- 3) алгоритм фильтрации, ориентированный на использование в мобильных устройствах;
- 4) набор критериев оценки качества фильтрации и расчетные соотношения для их определения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 186 страниц текста, 74 рисунка и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика решаемой проблемы, обоснована актуальность темы, определены цели, задачи и методы исследования, отмечены научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения по апробации, внедрению результатов, публикациях, структуре и объему диссертации.

В первой главе выполнен анализ типовых архитектур ГИС, их ключевых модулей, процесса обработки геоданных, стратегии разделения ответственности за обработку информации, выявлены их преимущества и недостатки.

Выполнен анализ источников геоданных в мобильных устройствах: навигационных приемников, Wi-Fi точек доступа, вышек сотовой связи, Bluetooth маячков, пассивных источников, сенсоров (акселерометров, магнетометров, гироскопов). По каждому источнику выявлены причины и характер отклонений треков от реальных маршрутов движения, выполнен статистический анализ выбросов геокоординат в местах стоянок, определены отличительные характеристики выбросов, рассмотрены существующие модели и методы обработки геоданных, выполнен анализ треков, полученных с их помощью.

Для увеличения точности геопозиционирования предложено использовать дополнительную информацию: скорость, геометрическое снижение точности, число спутников, данные акселерометра, гироскопа и магнетометра, а также семантическую информацию из конечного мобильного приложения, так как по действиям пользователя возможно косвенно определить геопозицию.

Выполнена формальная постановка задачи увеличения степени

соответствия трека реальному маршруту движения. Пусть:

- 1) $L_{groundTruth} = L(t, x^g, y^g)$ – реальная траектория движения объекта;
- 2) $L_{raw} = \{r_i, i = \overline{1, I}\}$ – упорядоченное множество геокоординат движущегося объекта, получаемых мобильным устройством, $r_i = \langle t_i, x_i^r, y_i^r, Q_i \rangle$, характеризующихся временем получения геокоординаты t_i , широтой x_i^r , долготой y_i^r и множеством дополнительных параметров Q_i , при этом:
 - $\forall r_i = \langle t_i, x_i^r, y_i^r, Q_i \rangle \in L_{raw}: \exists! g_i = \langle t_i, x_i^g, y_i^g \rangle \in L_{groundTruth}$;
 - $\exists L'_{raw} = \{r_i \in L_{raw}, i \in M \subseteq I\} : D(g_i, r_i) \leq \varepsilon$, где D – расстояние между точками g_i и r_i ;
- 3) $L_{predicted} = F(L_{raw}) = \{p_i, i \in N \subseteq I\}$ – упорядоченное множество обработанных геокоординат $p_i = \langle t_i, x_i^p, y_i^p \rangle = f(r_k, k = \overline{i-j, i})$, где j – количество точек, участвующих в обработке для получения точки p_i . Условие отражает обработку в реальном времени, при этом $\forall p_i = \langle t_i, x_i^p, y_i^p \rangle \in L_{predicted}: \exists! r_i = \langle t_i, x_i^r, y_i^r, Q_i \rangle \in L_{raw}$;
- 4) $L_{approx} = L(L_{predicted})$ – кривая, интерполирующая $L_{predicted}$, при этом $\forall p_i \in L_{predicted}: \exists! a_i = p_i \in L_{approx}$.

Постановка задачи для получения оптимального решения: дано L_{raw} , необходимо найти $L_{predicted}$ с минимальным количеством точек N , такое, что точки интерполирующей кривой L_{approx} находятся на реальной траектории движения $L_{groundTruth}$:

$$\forall a_i \in L_{approx}: d_i = D(g_i, a_i) \rightarrow 0 \text{ и } N \rightarrow \min. \quad (1)$$

В данной постановке задача относится к классу задач двухкритериальной оптимизации. Минимальное количество точек отражает условие минимальной плотности точек трека. При заданных исходных данных нахождение точного решения задачи не представляется возможным, поэтому в работе была поставлена и решена задача улучшения достигнутых на сегодня характеристик приближенного решения.

Постановка задачи улучшения существующих решений: дано L_{raw} , необходимо найти $L_{predicted}$ с минимальным количеством точек N , такое, что точки интерполирующей кривой L_{approx} с вероятностью, превышающей достигнутую $q \geq q_{\text{достигн.}}$, отстоят от реальной траектории движения $L_{groundTruth}$ на расстояние не более допустимого $d_{\text{доп.}}$, которое меньше достигнутого к настоящему времени $d_{\text{достигн.}}$:

$$q[\forall a_i \in L_{approx}: d_i = D(g_i, a_i) \leq d_{\text{доп.}} < d_{\text{достигн.}}] \geq q_{\text{достигн.}} \text{ и } N \rightarrow \min. \quad (2)$$

Условие (2) также целесообразно рассматривать как критерий качества алгоритма фильтрации при известной реальной траектории $L_{groundTruth}$. В этом случае в качестве первого критерия возможно рассматривать минимум функции ошибки, зависящей от $L_{groundTruth}$ и $L_{predicted}$, которая сравнивает идентичность двух ломаных. Указанная задача подробно рассмотрена в главе 4.

В выводах главы приведена предпочтительная стратегия разделения ответственности обработки геоданных в ГИС, перечислены приоритетные для использования источники геоданных, указаны типы отклонений геокоординат,

отмечены неформальные критерии эффективности фильтрации, формальная постановка задачи работы.

Вторая глава посвящена разработке метода обработки потока геолокационных данных, представленного на Рисунке 2.

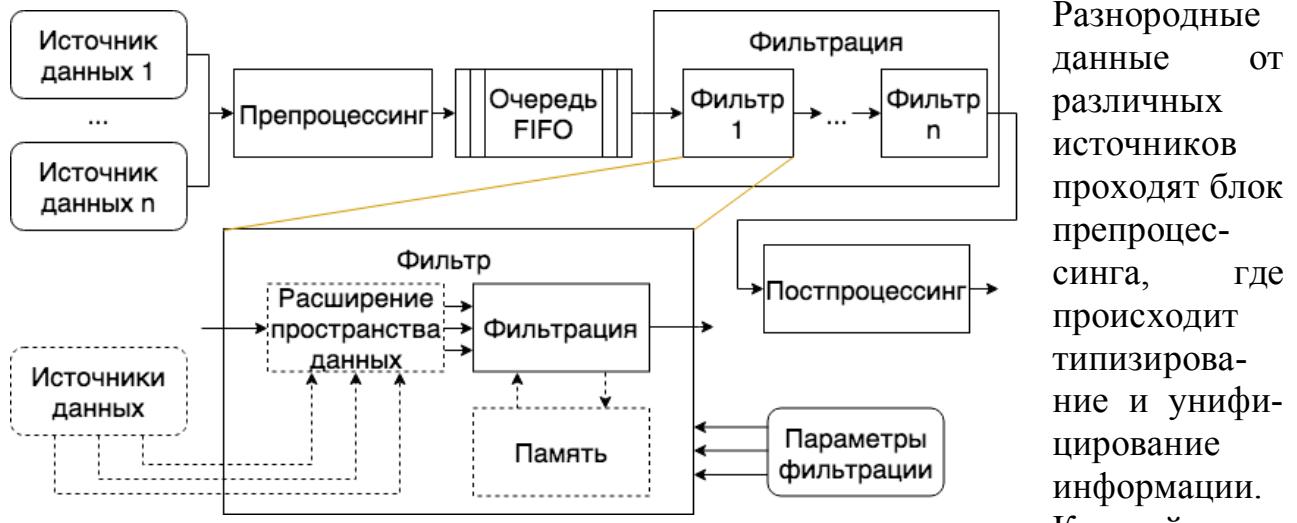


Рисунок 2. Схема обработки потока геолокационных данных

фильтр в каскаде может включать модуль расширения пространства данных, который дополняет входные данные информацией из других источников. Параметры фильтрации состоят из статических и динамически вычисляемых коэффициентов, которые регулируют поведения фильтра. Блок памяти сохраняет вычисленные на предыдущих шагах характеристики. Постпроцессинг заключается в окончательном сглаживании и разрежении.

Для реализации предложенного метода проведено детальное исследование источников и разработана модель описания входных и выходных геоданных для обработки:

$$x_i = \langle t_i, lat_i, lon_i, hdop_i, acc_i, spd_i, sat_i, tp_i, s_i \rangle, a_i = \langle t_i, ax_i, ay_i, az_i \rangle, \quad (3)$$

где i – порядковый номер точки местоположения; t – время фиксации точки; lat, lon – широта и долгота точки; $hdop$ – геометрическое снижение точности в горизонтальной плоскости; acc – радиус круга, в котором находится текущие координаты lat и lon с вероятностью $\sim 68\%$ (1σ); spd – моментальная скорость в текущей точке; sat – число спутников, принимающих участие в определении точки; tp_i – тип источника; s_i – признак стоянки, ax_i, ay_i, az_i – ускорения мобильного устройства по осям x, y и z соответственно. Поскольку метод обработки ориентирован на использование различных источников, в работе определены расчетные соотношения для предобработки данных, которые позволяют доопределить данные, не предоставляемые некоторыми источниками.

Далее в работе выполнен системный анализ задачи фильтрации геоданных на мобильных устройствах в реальном времени, статистический анализ треков, построенных по геокоординатам от разных источников. В результате декомпозиции задачи в качестве блока фильтрации предложено использовать последовательность из 9 фильтров, выделенных по функциям и группам параметров обработки. Первые фильтры в наборе основаны на существующих методах и используют пороговые функции от различных параметров координат.

Разнородные данные от различных источников проходят блок препроцессинга, где происходит типизирование и унификация информации. Каждый

Каждый из порогов зависит от коэффициентов, задаваемых статически или динамически. Последующие фильтры рассчитывают интегральные или дифференциальные характеристики движения, по которым возможно корректно идентифицировать выбросы и отклонения координат. Подход позволяет снизить вычислительную и емкостную сложность за счет отбора координат в первую очередь менее ресурсоемкими алгоритмами. Расчетные соотношения фильтров были определены на основе результатов статистического анализа треков.

Каждый фильтр рассматривается как функция $F_j(\{x_i\}, \{P^j\}) \in \{0,1\}$, где j – порядковый номер фильтра в последовательности; $\{x_i\}$ – упорядоченное множество входных точек; i – порядковый номер координаты; $\{P^j\}$ – множество параметров фильтрации. Если $F_j = 0$, фильтр не пропускает координату на выход, иначе – пропускает. Результатом фильтрации является кортеж модифицированных геоданных и класс точки: валидная или нет (1 или 0).

Фильтр по точности. Цель фильтрации – исключить на начальном этапе координаты со значительной погрешностью, анализируя параметры точности acc_i , $hdop_i$ и sat_i . В основу построения фильтра положены результаты статистического анализа выборки геокоординат из 368528 точек, по результатам которого были выявлены ключевые особенности поведения гистограмм в разрезе каждого источника, выявлены зависимости между параметрами и определены их граничные значения. Итоговое упрощённое выражение фильтра:

$$F_1 \left(\langle sat_i, hdop_i, acc_i, tp_i \rangle, \begin{matrix} P_{minSat}^1, P_{maxHdop}^1, P_{maxAcc}^1 \end{matrix} \right) = \begin{cases} 0, & \text{если } (tp_i = 0 \text{ или } tp_i = 1) \text{ и} \\ & sat_i < P_{minSat}^1 \text{ или } tp_i = 0 \text{ и} \\ & hdop_i > P_{maxHdop}^1 \text{ или } acc_i > P_{maxAcc}^1 \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (4)$$

где P_{minSat}^1 – минимальное количество спутников; $P_{maxHdop}^1$ – максимальное значение характеристики $hdop$; P_{maxAcc}^1 – максимальное значение точности.

Фильтр сетевых координат. Цель фильтрации – предотвратить влияние низкой точности сетевых координат на следующие фильтры в последовательности. На основе результатов статистического анализа:

$$F_2 \left(\langle t_i, tp_i \rangle, P_{lastGPSTime}^2, \begin{matrix} P_{networkPeriod}^2, Q_{isStand} \end{matrix} \right) = \begin{cases} 0, & \text{если } Q_{isStand} = 0 \text{ и } tp_i = 2 \text{ и} \\ & t_i - P_{lastGPSTime}^2 < P_{networkPeriod}^2, \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (5)$$

где $P_{lastGPSTime}^2$ – время получения последней спутниковой координаты; $P_{networkPeriod}^2$ – время исключения сетевых координат; $Q_{isStand}$ – признак присутствия пользователя в состоянии стоянки.

Фильтр по времени. Цель фильтрации – уменьшить плотность точек за счет порога по времени и учета приоритета API источника перед NMEA. На основе статистического анализа получена итоговая функция F фильтра:

$$F_3 \left(\langle \langle t_i, tp_i \rangle, \langle t_{i-1} \rangle \rangle, \begin{matrix} P_{period}^3, P_{lastLocationTime}^3, \\ P_{locationPeriod}^3, Q_{isStand} \end{matrix} \right) = \begin{cases} 0, & \text{если } t_i - t_{i-1} < P_{period}^3 \text{ или} \\ & Q_{isStand} = 0 \text{ и } tp_i = 0 \text{ и} \\ & t_i - P_{lastLocationTime}^3 < P_{locationPeriod}^3 \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (6)$$

где P_{period}^3 – период съема координат; $P_{lastLocationTime}^3$ – время последней API координаты; $P_{locationPeriod}^3$ – время исключения координат NMEA.

Фильтр по скорости. Цель фильтрации – исключить координаты со скоростью, больше максимально возможной $P_{maxSpeed}^4$. В случае, если отношение реальной пройденной дистанции к максимальной, определенной по максимальной скорости и интервалу времени между координатами, больше коэффициента P_{distK}^4 , следует отфильтровать текущую координату. Указанный метод отчасти решает задачу фильтрации координат с недостоверными параметрами точности, косвенно определяя реальную погрешность определения местоположения:

$$F_4 \left(\begin{array}{l} \{\langle t_i, lat_i, lon_i, spd_i \rangle, \} \\ \{\langle t_{i-1}, lat_{i-1}, lon_{i-1} \rangle\}, \\ P_{maxSpeed}^4, P_{maxTime}^4, P_{distK}^4 \end{array} \right) = \begin{cases} 0, & \text{если } spd_i > P_{maxSpeed}^4 \text{ или} \\ & t_i - t_{i-1} \leq P_{maxTime}^4 \text{ и} \\ & \frac{D(lat_i, lon_i, lat_{i-1}, lon_{i-1})}{P_{maxSpeed}^4 * \frac{(t_i - t_{i-1})}{1000}} > P_{distK}^4, \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (7)$$

где $P_{maxTime}^4$ – максимальный интервал времени для анализа скорости; $D(lat_i, lon_i, lat_{i-1}, lon_{i-1})$ – расстояние между координатами.

Анализ распределения параметров координат до и после фильтрации по скорости и подтвердил гипотезы, на основе которых был разработан метод. Фильтр позволяет отбросить порядка 4.6 % координат с высокой погрешностью, при этом среднее значение точности в выборке уменьшилось на 6.2 м (16.4 %), сигма – на 22.9 м (15 %).

Фильтр по ускорению. Цель фильтрации – исключить координаты с ускорением, больше максимально возможного $P_{maxAccel}^5$. Поскольку существует слабая корреляция параметров ускорения и точности, распределение точности после работы фильтра изменится незначительно. При $P_{maxAccel}^5 = \frac{9.81 \text{ м}}{2 \text{ с}^2}$ фильтр отбросит 3.2% координат, среднее значение точности изменится в большую сторону на 0.1 м (0.2 %), среднеквадратичное отклонение – на 0.4 м (0.3 %).

Фильтр стоянок. Цель фильтрации – выявить состояния стоянок пользователя и исключить существенные выбросы и девиации координат. Признак стоянки $Q_{isStand}$ определяется по дисперсии ускорения σ_a^2 и скорости σ_s^2 за промежутки времени $[t_i - P_{periodCoora}^6; t_i]$ и $[t_i - P_{periodAccel}^6; t_i]$ соответственно:

$$Q_{isStand} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma_a^2 < P_{accelCut}^6 \text{ или } \sigma_s^2 < P_{speedCut}^6, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (8)$$

где $P_{accelCut}^6$ и $P_{speedCut}^6$ – верхние пороги дисперсии ускорения и скорости, до которых фильтр считает текущую точку стоянкой. Если $Q_{isStand} = 1$, следует модифицировать широту lat_i , долготу lon_i и признак стоянки s_i для текущей координаты в предположении, что она является продолжением стоянки.

Далее в работе приведен анализ распределения скорости координат и экспертный анализ треков продолжительных стоянок, полученных до и после работы фильтра. Процент всех отфильтрованных координат – 98.9, с нулевой скоростью – 99.0, с положительной – 96.1. Итоговая пройденная дистанция с 13764 м уменьшилась до 3545 м (74.2 %).

Сглаживающий фильтр. Цель фильтрации – сгладить ломаную линию трека на основе экспоненциального скользящего среднего. Преимущество алгоритма – низкая вычислительная и емкостная сложность, и как следствие малое время выполнения. В работе рассмотрено влияние сглаживающего фильтра на последовательность координат на основе распределений угла между двумя прямыми, построенными по двум парам из каждой тройки координат в исходной выборке. *Угловой фильтр.* Цель фильтрации – уменьшить плотность точек трека, на основе анализа угла между направлениями движения B :

$$F_8 \left(\{ \langle t_i, lat_i, lon_i, spd_i \rangle, \langle t_{i-1}, lat_{i-1}, lon_{i-1}, spd_{i-1} \rangle, \langle lat_{i-2}, lon_{i-2}, spd_{i-2} \rangle \}, P_{maxTimeDiff}^8, P_{maxAngle}^8, P_{maxSpeed}^8 \right) = \\ = \begin{cases} 0, \text{ если } t_i - t_{i-1} < \begin{cases} 1000, \text{ если } \alpha > P_{maxAngle}^8 \\ \frac{1000 - P_{maxTimeDiff}^8}{P_{maxAngle}^8} * \alpha + P_{maxTimeDiff}^8, \text{ иначе} \end{cases} \\ \text{или } t_i - t_{i-1} < P_{maxTimeDiff}^8 * 3 \text{ и } \alpha > \begin{cases} P_{maxAngle}^8, \text{ если } \bar{\vartheta} > P_{maxSpeed}^8 \\ \frac{P_{maxAngle}^8 - 180}{P_{maxSpeed}^8} * \bar{\vartheta} + 180, \text{ иначе} \end{cases} \\ 1, \text{ иначе} \end{cases} \quad (9)$$

где $\alpha = |B(lat_i, lon_i, lat_{i-1}, lon_{i-1}) - B(lat_{i-1}, lon_{i-1}, lat_{i-2}, lon_{i-2})|$, $P_{maxAngle}^8$ – максимальный угол, при котором координата будет отфильтрована, если интервал времени меньше 1 с; $P_{maxTimeDiff}^8$ вместе с параметром $P_{maxAngle}^8$ задают максимальный интервал времени, за который координаты будут отфильтрованы при угле $\alpha = 0^\circ$, и максимальный угол, в пределах значения которого координаты будут отфильтрованы, если интервал времени будут соответствовать рассчитанному диапазону. Иными словами, порог интервала времени динамически зависит от угла между направлениями движения. $\bar{\vartheta}$ – средняя скорость по трем координатам; $P_{maxSpeed}^8$ – максимальная скорость, при которой координата будет отфильтрована. В результате прямые участки трека представляются меньшим числом точек, кривые – большим.

В работе приведен статистический анализ распределения угла α . Среднее значение угла до и после фильтрации составляет 61.1° и 90.4° соответственно, среднеквадратичное отклонение – 61.5° и 65.6° . Фильтр сместил среднее значение угла в центр распределения, однако дисперсия поменялась незначительно. Количество координат после фильтрации уменьшилось на 79.0 %.

Диагностический фильтр. Предлагаемый метод аддитивной диагностической фильтрации основан на подходе, при котором критерий фильтра рассчитывается как: $D_{i-1,i} > Dl_{i-1} + Dl_i$, где Dl_{i-1} и Dl_i пропорциональны точности снятия координат. Цель фильтрации – исключить координаты со значительным отклонением в местах стоянок. Идея заключается в 2 основных гипотезах:

- 1) уменьшая пороговые значения Dl_{i-1} и Dl_i при «входе» и «выходе» из стоянки, возможно сохранить координаты движения около стоянок, что увеличит качество трека;
- 2) увеличивая пороговые значения прямо пропорционально точности и

обратно-пропорционально скорости, возможно уменьшить количество выбросов в местах стоянок, где скорость существенно ниже, чем в движении.

На основе указанных гипотез для очередной координаты i :

$$Dl_i + Dl_{i-1} = Dist(\{\langle acc_i, spd_i, tp_i, s_i \rangle, \langle acc_{i-1}, spd_{i-1}, tp_{i-1}, s_{i-1} \rangle\}) = \\ \begin{cases} f_{acc}(acc_{i-1}, tp_{i-1}) + f_{acc}(acc_i, tp_i), & \text{если } s_i = 1 \text{ и} \\ & spd_{i-1} > P_S^9 \text{ или } s_{i-1} = 1 \text{ и } spd_i > P_S^9, \\ f_{acc}(acc_{i-1}, tp_{i-1}) * f_K(spd_{i-1}) + f_{acc}(acc_i, tp_i) * f_K(spd_i), & \text{иначе} \end{cases}, \quad (10)$$

где $f_{acc}(acc_i, tp_i) = \begin{cases} \frac{acc_i}{P_K^9}, & \text{если } tp_i = 2 \\ acc_i, & \text{иначе} \end{cases}$ – функция, учитывающая низкие точности координат от Wi-Fi и вышек сотовой связи; P_S^9 – минимальная скорость, которая предположительно является скоростью пользователя после выхода из стоянки; P_K^9 – безразмерный параметр.

Далее в работе рассмотрены необходимые ограничения функции $f_K(spd)$ и исходя из минимизации вычислительных затрат выбрана линейная функция.

Итоговая функция:

$$F_9 \left(\begin{array}{c} \{\langle lat_i, lon_i, acc_i, spd_i, tp_i, s_i \rangle, \langle lat_{i-1}, lon_{i-1}, acc_{i-1}, spd_{i-1}, tp_{i-1}, s_{i-1} \rangle\}, \\ P_K^9, P_S^9 \end{array} \right) = \\ = \begin{cases} 0, & \text{если } Dist(\{\langle acc_i, spd_i, tp_i, s_i \rangle, \langle acc_{i-1}, spd_{i-1}, tp_{i-1}, s_{i-1} \rangle\}) \leq \\ & D(lat_i, lon_i, lat_{i-1}, lon_{i-1}), \text{ и } s_{i-1} = 0, \text{ и } s_i = 0 \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (11)$$

Если $Dist \leq D$, и предыдущая координата – стоянка, метод не отфильтровывает координату, а модифицирует все ее параметры, в соответствии с предположением, что текущая координата является продолжением стоянки. Очевидно, что при увеличении P_K^9 , фильтр способен определить более дальние выбросы координат при скорости от 0 до P_S^9 , а скорость P_S^9 фактически определяет границу фильтрации значительных выбросов в местах стоянок.

Результаты статистического, экспертного и сравнительного анализа треков до и после фильтрации показали высокую эффективность метода.

В выводах главы приведена модель входных и выходных данных, общий метод фильтрации потока геолокационных данных, результаты статистического анализа треков, а также полученные оценки эффективности работы рассмотренных методов.

В третьей главе уточнена модель входных и выходных данных, с целью ее использования в мобильных операционных системах. Метод фильтрации дополнен фильтрами типов источников, спутников и ложных координат.

Детально рассмотрены несколько подходов для использования семантической информации из мобильного приложения и выбран подход на основе триггера, который сбрасывает текущие состояния и сохраненные значения параметров фильтров. Тем самым на непродолжительное время до получения следующих координат, когда завершится переходный процесс в фильтрах, уменьшается точность фильтрации, но увеличивается скорость их выдачи.

Поскольку многие модули фильтрации хранят как различные параметры координат за определенный период времени, так и внутренние параметры, в

метод был добавлен кеш координат и состояний, за счет которого возможно восстанавливать состояние системы после перезагрузки, а также гибко настраивать параметры фильтров под размер общей памяти.

На основе уточненных моделей и методов предложен алгоритм фильтрации потока геоданных (см. Рисунок 3, зеленым выделены базовые фильтры, рассмотренные во второй главе), ориентированный на мобильные устройства, который основан на каскаде 12-ти фильтров потоковой обработки и использует 25 статических параметров, два общих параметра и три вычисляемых.

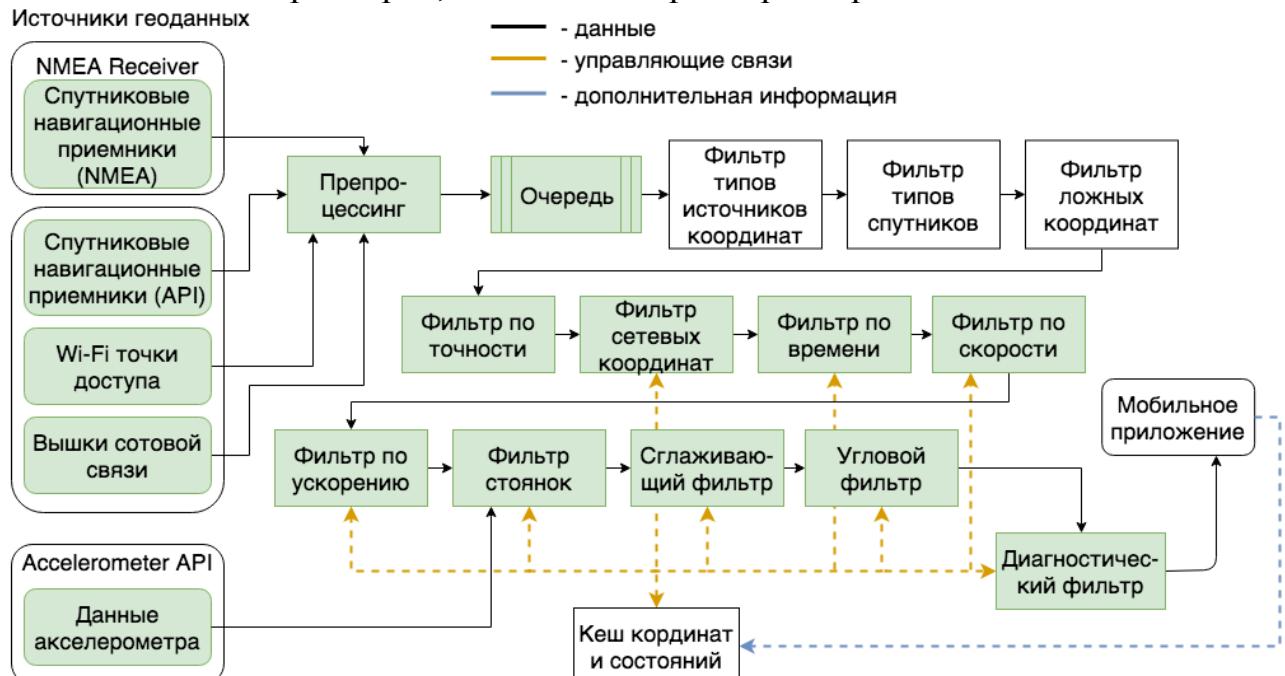


Рисунок 3. Схема фильтрации потока геоданных

Отличие предложенного алгоритма от существующих методов фильтрации состоит в том, что он использует все возможные источники геоданных, акселерометр мобильного устройства, блок разрежения точек трека, а также диагностическую обработку, учитывающую скорость устройства, что позволяет снизить выбросы в местах стоянок и уменьшить плотность точек трека.

Для разработанных частных алгоритмов фильтрации и препроцессинга были вычислены необходимые объемы памяти, оценки времени выполнения в лучшем и худшем случаях, а также вычислительные сложности. Рассмотрена задача оптимизации, позволяющая определить оценку времени общего алгоритма фильтрации в худшем и лучшем случаях соответственно:

$$T_{max} = \sum_{j=1}^{p \leq n} T_j \rightarrow max, \text{ при } F_{j-1}(\{x_i\}, \{P^{j-1}\}) = 1 \text{ и } T_{j-1} = T_{j-1}^+, \text{ если } j > 1; \quad (12)$$

$$T_{min} = \sum_{j=1}^{q \leq n} T_j \rightarrow min, \text{ при } F_{j-1}(\{x_i\}, \{P^{j-1}\}) = 1 \text{ и } T_{j-1} = T_{j-1}^-, \text{ если } j > 1, \quad (13)$$

где $n = 12$ – максимальное количество фильтров в последовательности; p, q – количество фильтров в последовательности, оценка времени выполнения алгоритма фильтрации которой максимальна и минимальна соответственно; T_j^+, T_j^- – оценки времени выполнения алгоритма работы фильтра с порядковым номером j при $F_j(\{x_i\}, \{P^j\}) = 1$ и $F_j(\{x_i\}, \{P^j\}) = 0$ соответственно.

Максимум функции T_{max} достигается в случае $p = 12$, при этом все оценки T_j^+ равны максимальному времени выполнения алгоритма T_j^{max} . Таким

образом верхняя оценка времени выполнения соответствует сумме всех T_j^{max} для максимального количества фильтров в последовательности, а нижняя будет ограничиваться набором всего одного фильтра, когда $F_1(\{x_i\}, \{P^1\}) = 0$:

$$T_{max} = \sum_{j=1}^{12} T_j^{max}, T_{min} = \sum_{j=1}^1 T_j = T_1^-.$$
 (14)

Вычислительная сложность общего алгоритма фильтрации, аналогично задаче оптимизации выше, имеет максимум при количестве фильтров, равном 12, и линейно зависит от размера кеша координат и состояний.

В выводах главы приведена уточненная модель входных и выходных данных, дополнительные методы фильтрации, алгоритм фильтрации потока геоданных, ориентированный на мобильные устройства, значения оценок быстродействия алгоритмов и их особенности.

В четвертой главе для оценки эффективности фильтрации использовался набор тестовых данных, включающий 24 трека с общим количеством точек – 161019. Эффективность оценивалась в сравнении со стандартным API геолокации Android, технологией Fused геолокации, методом диагностической фильтрации и фильтром Калмана. Для количественной оценки эффективности был выбран набор характеристик на основе существующих и новых предложенных методов оценки качества обработки геоданных.

Оценка пройденного расстояния. Есть разница E_d^i между пройденным расстоянием по реальному маршруту $D_{groundTruth}^i$ и дистанции после фильтрации $D_{predicted}^i$, где i – порядковый номер трека. Также рассматривается среднее значение \bar{E}_d и среднеквадратичное отклонение σ_{E_d} . Если $\bar{E}_d > 0$, алгоритм фильтрации преимущественно занижает пройденную дистанцию по отношению к реальному маршруту, иначе – завышает. Если $\bar{E}_d = 0$ при условии, что σ_{E_d} мало, можно говорить о высокой степени качества фильтрации.

Оценка плотности точек в треке. Оценка плотности точек N соответствует отношению количества точек в исходном датасете N_{raw} к количеству точек после фильтрации $N_{predicted}$. Чем больше значение, тем больше разрежен трек.

Оценка времени обработки. Среднее время между точками на выходе системы:

$$\overline{T_{out}} = \frac{1}{N_{predicted}-1} \sum_{i=1}^{N_{predicted}-1} T_{out}^{i,i+1},$$
 (15)

где $T_{out}^{i,i+1}$ – интервал времени между i и $i + 1$ координатами, полученными на выходе системы. Также рассмотрено среднеквадратичное отклонение $\sigma_{T_{out}}$. Чем меньше значение $\overline{T_{out}}$, тем меньше время отклика системы

Оценка быстродействия фильтрации. Оценка быстродействия есть среднее время выполнения общего алгоритма фильтрации:

$$\overline{T_p} = \frac{1}{N_{raw}} \sum_{i=1}^{N_{raw}} T_p^i,$$
 (16)

где T_p^i – время обработки одной координаты, среднее время выполнения алгоритма фильтрации на устройствах HUAWEI MediaPad 7 Lite (Android 4.0.3) и Lenovo Tablet 8704X (Android 7.1.1). Также рассмотрено среднеквадратичное отклонение σ_{T_p} .

Оценка точности фильтрации. Поскольку предложенный алгоритм

фактически представляет собой бинарный классификатор, способный предсказывать один единственный класс координаты, для оценки точности целесообразно использовать соотношения достоверности (англ. Accuracy), точности (англ. Precision) и полноты (англ. Recall). Для их расчета каждым координатам i в исходных и результирующих треках после фильтрации ставятся в соответствие параметры-маркеры $p_i^{groundTruth}, p_i^{predicted} \in \{0,1\}$ соответственно. Оценки сильно зависят от ложно-отрицательных решений (англ. False Negative, Type-II Error), когда точка валидная, однако, например, была отброшена только для уменьшения плотности трека. Чтобы уменьшить влияние этих решений на оценки точности, в работе предложен метод маркировки, где маркеры $p_i'^{groundTruth}, p_i'^{predicted} \in \{0,1,2\}$, при этом 0 – невалидная точка с большой погрешностью, 1 – валидная точка с малой погрешностью (координата в движении или первая точка в стоянке), 2 – валидная точка (последующая координата за первой в стоянке). В истинно-отрицательные решения N'_{TN} , были добавлены неверные ложно-отрицательные N'_{FN} , где $p_i'^{groundTruth} = 1$ или 2 и $p_i'^{predicted} = 0$, однако в эту же сумму были включены верные ложно-отрицательные решения, что является недостатком метода. Пусть N'_{TP} – истинно-положительные, а N'_{FP} – ложно-положительные решения, тогда достоверность $E_{acc\%}$ или процент точек, по которым классификатор принял верное решение, а также точность $E_{precision}$, полнота E_{recall} и их оценки в процентах $E_{precision\%}$ и $E_{recall\%}$:

$$E_{acc\%} = \frac{N'_{TP} + N'_{TN}}{N_{raw}} * 100, E_{precision} = \frac{N'_{TP}}{N'_{TP} + N'_{FP}}, E_{recall} = \frac{N'_{TP}}{N'_{TP} + N'_{FN}}, \quad (17)$$

$$E_{precision\%} = E_{precision} * 100, E_{recall\%} = E_{recall} * 100. \quad (18)$$

Также введена объединенная характеристика – F_1 мера, гармоническое среднее, учитывающее показатели в случаях несбалансированности классов:

$$E_{F_1} = \frac{2E_{precision}E_{recall}}{E_{precision} + E_{recall}}. \quad (19)$$

Ошибка фильтрации координат. В работе также предложен метод оценки эффективности фильтрации по значению функции ошибки. Целевой маршрут и трек после фильтрации представляются ломаными линиями, заданными вектором кортежей, которые определяют точки в трехмерном пространстве:

$$L_{groundTruth} = (\dots, \langle t_i, lat_i, lon_i \rangle, \dots), L_{predicted} = (\dots, \langle t_j, lat_j, lon_j \rangle, \dots). \quad (20)$$

Маршрут $L_{groundTruth}$ составляется из точек с $p_i'^{groundTruth} = 1$ или 2, при этом точки с $p_i'^{groundTruth} = 2$ смещаются в начало стоянки – ближайшую предыдущую по времени точку с $p_i'^{groundTruth} = 1$.

Функция ошибки E_{loss} должна сравнивать идентичность ломаных $L_{groundTruth}$ и $L_{predicted}$ как по пространственным координатам lat_i и lon_i , так и по временным t_i . Чем больше они различаются, тем больше значение ошибки и наоборот. В общем случае $E_{loss} \in [0; \infty)$. При этом известно, что ломаные изначально так расположены в пространстве, что $E_{loss} = min$, так как всегда рассматривается одна и та же реальная траектория движения. Вектор $L_{predicted}$ в случае идеальной фильтрации должен совпадать с $L_{groundTruth}$, и $E_{loss} = 0$.

Рассмотрены возможные решения задачи нахождения максимально достоверной функции E_{loss} : ковариационный анализ, анализ Фурье, а также три подхода, основанные на векторном представлении ломаных. Указано, что все методы в общем случае малоэффективны, поскольку с высокой степенью недостоверности вычисляют ошибку E_{loss} . Для декомпозиции задачи выделены частные случаи анализа двух ломаных. Допустим моменту времени t_k соответствуют две точки x_{k1} и x_{k2} на обоих ломаных, тогда:

$$E_{loss}^1 \sim D(x_{k1}, x_{k2}), \text{ где } D - \text{расстояние между точками } x_{k1} \text{ и } x_{k2}. \quad (21)$$

Рассмотрим второй случай, когда для момента времени t_k существует только одна точка x_k на одной из ломаных. Ошибка будет пропорциональна расстоянию от точки x_k на первой ломаной до точки \tilde{x}_l на второй, которую целесообразно определить, как точку с местоположением пользователя, где бы он находился на второй ломаной в момент времени t_k .

Рассмотрим метод определения точки \tilde{x}_l , когда на второй ломаной находятся две точки $x_l = (lat_l, lon_l)$ и $x_{l+1} = (lat_{l+1}, lon_{l+1})$, предыдущая и следующая по отношению к моменту времени t_k . Ошибка в этом случае имеет вид:

$$E_{loss}^2 \sim D(x_k, \tilde{x}_l) = D'(x_k, x_l, x_{l+1}), \quad (22)$$

где D' – расстояние между точкой x_k и дугой, составленной из точек x_l и x_{l+1} .

В случае определения функции D' по скорости или по кратчайшему отрезку или дуге, накопленная ошибка для E_{loss}^2 может быть значительна. Предложено определить D' как разницу сумм расстояний от x_l до x_k , от x_k до x_{l+1} и от x_l до x_{l+1} :

$$E_{loss}^2 \sim D(x_k, \tilde{x}_l) = D'(x_k, x_l, x_{l+1}) = D(x_l, x_k) + D(x_k, x_{l+1}) - D(x_l, x_{l+1}). \quad (23)$$

Общая ошибка E_{loss} в этом случае соответствует:

$$E_{loss} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\max(N_{predicted}, N_{groundTruth})} E_i^2}{\max(N_{predicted}, N_{groundTruth})}}, \quad (24)$$

где $E_i = D(x_{i1}, x_{i2})$, если точки есть на обоих ломаных, $E_i = D(x_i, x_l)$, если точки x_{l+1} нет на одной ломаной, $E_i = D(x_i, x_{l+1})$, если точки x_l нет на одной ломаной, и, наконец, $E_i = D(x_l, x_i) + D(x_i, x_{l+1}) - D(x_l, x_{l+1})$, если обе точки x_l и x_{l+1} есть на одной ломаной. Рассмотрено также среднее значение ошибки E_{loss} .

Результаты экспериментов приведены в Таблице 1. Пример фильтрации по предложенному алгоритму приведен на Рисунке 4.

Из анализа треков следует, что предложенный алгоритм отфильтровал исходные данные, существенно уменьшив плотность трека в движении и верно определив все три стоянки пользователя рядом и внутри здания.

Выводы по четвертой главе содержат описание наборов данных, по которым оценивалась эффективность, предложенные методы оценок и результаты экспериментов.

Заключение

В процессе выполнения диссертации получены новые научные результаты в области увеличения точности геопозиционирования на мобильных устройствах в реальном времени:

Результаты экспериментов

Таблица 1.

| Оценка Обозначение | API гео- локация | Fused техно- логия | Ди- агно- стиче- ская фильтрация | Фильтр Калмана | Пред- ложен- ный алго- ритм |
|--|---------------------|--------------------------|--|-------------------|--------------------------------------|
| Расстояние $\bar{E}_d \pm \sigma_{E_d}$, тыс. м | 196±673 | 27.9±24 | 194±670 | 196±673 | 0.9±2.2 |
| Плотность точек N | 2.2 | 1.0 | 1.9 | 1.4 | 2.9 |
| Точность | $E_{acc\%}$ | 70.2 | 59.5 | 97.8 | 51.6 |
| | $E_{precision\%}$ | 99.1 | 97.8 | 99.7 | 98.9 |
| | $E_{recall\%}$ | 34.7 | 59.1 | 96.1 | 32.9 |
| | E_{F_1} | 0.51 | 0.74 | 0.98 | 0.49 |
| Ошибка \bar{E}_{loss} , м | 72.0 | 13.8 | 47.8 | 59.7 | 13.1 |
| Время $\bar{T}_{out} \pm \sigma_{T_{out}}$, с | 12±343 | 3±75 | 11±319 | 8±274 | 17±312 |
| Быстродействие $\bar{T}_p \pm \sigma_{T_p}$, мс | 0.5±1.0 | 480±449 | 0.7±1.5 | 1.3±2.5 | 3.4±8.3 |

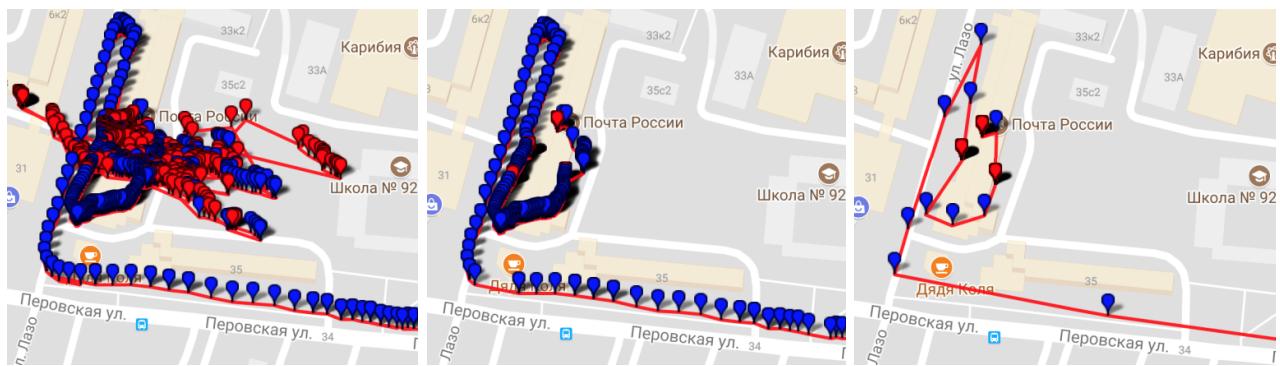


Рисунок 4. Экспериментальные результаты

1) на основе результатов анализа треков выявлены причины и характер их отклонений от реальных маршрутов движения, исследованы и классифицированы различные типы «выбросов» геокоординат, определены признаки отклонений геокоординат различных источников;

2) разработана формальная постановка задачи увеличения степени соответствия трека реальному маршруту движения что позволило систематизировать исходные данные и выбрать пути решения;

3) по результатам анализа источников разработан метод фильтрации и модель описания входных и выходных данных системы обработки геолокационных данных, выполнен статистический анализ собранных исходных геолокационных данных, выявлены зависимости между параметрами геокоординат, в результате получены расчетные соотношения для исключения «выбросов» геокоординат при построении трека;

4) разработан алгоритм последовательной обработки потока геоданных, ориентированный на мобильные операционные системы, с целью исключения координат с высокой погрешностью определения, сглаживания и уменьшения

плотности точек треков в реальном масштабе времени; рассчитаны оценки времен выполнения, необходимой памяти, вычислительной сложности, проведен анализ быстродействия ключевых частей алгоритма;

5) разработанный алгоритм реализован в виде двух библиотек на языке Java, которые позволяют эффективно осуществлять фильтрацию геокоординат как в мобильных приложениях, так и в серверных модулях ГИС;

6) разработан набор критериев оценки качества фильтрации: по расстоянию, плотности точек, времени обработки, быстродействию, точности и среднеквадратичной ошибке;

7) с учетом разработанных критериев на основе сформированных репрезентативных тестовых наборов данных экспериментально определено, что среднее значение оценки отклонения пройденного расстояния от реального для предложенного алгоритма уменьшилось примерно в 30 раз в сравнении с Fused технологией. Количество точек в треках уменьшилось в ~3 раза, достоверность, точность, полнота и F1 мера максимальны, среднее значение ошибки минимально у предложенного алгоритма в сравнении с существующими рассмотренными методами фильтрации геокоординат. За счет обработки потока геокоординат набором фильтров среднее время между координатами увеличилось: около 17 с против 3 с у Fused технологии. Время обработки также ожидаемо увеличилось: около 3 мс, против 0.5 у API геолокации, что несущественно для современных мобильных устройств.

Разработанными в диссертации моделями, методами и алгоритмами обработки геоданных удалось решить часть задач увеличения точности геопозиционирования на мобильных устройствах, оставшиеся являются перспективными направлениями дальнейших исследований.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Головков А.А., Иванова Г.С. Метод оценки эффективности фильтрации геокоординат // Современные научноемкие технологии. № 5. 2018. С. 51-55. (0.5 п.л./ 0.3 п.л.)
2. Головков А.А. Методика обработки геоданных в мобильных устройствах // Динамика сложных систем - XXI век. № 2. 2018. С. 4-13. (0.8 п.л.)
3. Головков А.А. Источники геоданных в мобильных устройствах // Динамика сложных систем - XXI век. № 4. 2017. С. 94-101. (0.7 п.л.)
4. Головков А.А., Иванова Г.С. Адаптивная фильтрация потока геолокационных данных в реальном времени // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 4. С. 156-169. (0.7 п.л./ 0.5 п.л.)
5. Головков А.А. Особенности обработки данных местоположения в геоинформационных системах // Научные исследования в области технических наук. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 3. 2018. С. 66-69. (0.3 п.л.)
6. Головков А.А., Иванова Г.С. Обработка геолокационной информации как практическая задача машинного обучения // «Управление качеством инженерного образования. Возможности ВУЗов и потребности промышленности»: тезисы докладов второй международной научно-практической конференции. 2016. С. 314. (0.03 п.л./ 0.02 п.л.)