

Санкт-Петербургский Государственный Университет
Математико-механический факультет

Математическое обеспечение и администрирование информационных
систем
Кафедра системного программирования

Прошутинский Алексей Владимирович

Разработка алгоритма высокоточного
спутникового позиционирования с учетом
показаний одометра

Курсовая работа

Научный руководитель:
ст. преп. М. Н. Смирнов

Технический консультант:
И. О. Гладков

Санкт-Петербург
2018

Оглавление

Введение	3
1. Глоссарий	5
2. Постановка задачи и цели	6
3. Обзор существующих решений	7
4. Алгоритмы	8
4.1. Алгоритмы коррекции	8
4.2. Dead Reckoning	10
5. Тестирование	11
5.1. Генерация идеальных данных	11
5.2. Наложение шумов	11
6. Эксперимент	12
7. Текущие результаты	13
Заключение	14
Список литературы	15

Введение

Системы высокоточного позиционирования широко и с успехом применяются в различных областях, таких как картография, геодезия, сельское хозяйство [4], геодинамика и мониторинг геологической среды, прокладка железнодорожных и автомобильных магистралей, мостов и других сооружений на дорогах, нефте- и газопроводов, линий электропередач и связи, проектно-изыскательские работы, исполнительные съёмки, а с недавнего времени и в работе беспилотных автомобилей.

В основе технологии лежит уточнение сигнала, полученного со спутников ГНСС (Глобальных Навигационных Спутниковых Систем) GPS, GLONASS, Beidou, Galileo, IRNSS, QZSS и SBAS, с помощью референсных станций или других статичных приемников в режиме «базы». Данные могут приходиться по различным каналам связи, таким как Bluetooth, Wi-Fi, радио или по сети интернет. Это называется относительным позиционированием.

В относительном позиционировании участвуют два приемника: база и ровер. Первый приемник неподвижно стоит на точке, принимает сигналы со спутников, обрабатывает и отправляет по определенным каналам связи свое местоположение и поправки, второй приемник может стоять неподвижно (режим static) или двигаться (режим kinematic), он получает поправки и обрабатывает их, частично устраняя ошибки измерений, такие как ионосферные, тропосферные, задержки аппаратуры и ошибки часов.

Для решения определенных задач есть возможность использовать дополнительные данные для уточнения или восстановления решения (при отсутствии сигнала спутников). В данном случае мы рассматриваем автомобиль, как платформу для реализации алгоритмов уточнения позиционирования. Есть множество источников дополнительных данных: оптические сенсоры, IMU (Inertial Measurement Unit), а также показатели с одометра или бортового компьютера. В нашем случае мы будем использовать последний источник.

Возможны два варианта использования данных одометра. Во-первых,

получение позиции при полном отсутствии сигнала со спутников относительно последней известной позиции [9], это актуально при проезде автомобиля под мостом или в тоннеле. Во-вторых, уточнение существующего решения, используя в расчете относительной позиции данные с автомобиля.

В приемниках серии Emlid Reach используется самая популярная библиотека и наиболее полная для высокоточного позиционирования RTKLIB [7]. Этот программный продукт позволяет обрабатывать данные множества форматов с различных приемников, обрабатывать их как в реальном времени, так и в пост-процессинге. Но в нем отсутствуют интерфейсы и реализации для коррекции измерений посредством внешних сенсоров и для продолжения решения при отсутствии сигналов со спутников.

1. Глоссарий

RTKLIB - самая крупная и наиболее функциональная библиотека для высокоточного позиционирования.

RINEX - популярный формат текстовых файлов для представления измерений, полученных со спутника. Он содержит информацию для расчета позиции спутников и измерения псевдодалности и фазовые измерения для каждого из них, полученные конкретным приемником.

Эпоха - конкретная временная отметка, в которую были получены сигналы со спутников.

Псевдодалность - расстояние в метрах от приемника до спутника, рассчитанное текущему времени приемника и по времени отправки, полученному из кодовой последовательности сигнала со спутника.

Относительное позиционирование - позиционирование с участием двух приемников с субсантиметровой точностью. Основной проблемой является разрешение целого числа длин волн между приемником и спутником (фазовой неопределенности). Соответственно имеется два состояния решения: fix и float.

Fix-решение - самое точное решение, возникающее при успешном разрешении фазовой неопределенности.

Float-решение - если же на данной эпохе не было найдено fix-решение.

Фильтр Калмана - основное ядро расчета при относительном позиционировании. Чувствителен к срывам фазы и многолучевости. После них достаточно долго возвращается к fix-решению, что критично в городских условиях.

Срывы фазы - отсутствие фазовых измерений из-за нахождения на пути движения сигнала массивных объектов (деревья, мосты, дома).

Многолучевость - явление, при котором сигналы со спутников отражаясь от различных поверхностей, доходят до приемника в искаженном виде, что приводит к усложнению процесса нахождения точной позиции.

Dead reckoning - это метод получения позиции при отсутствии сигналов со спутника только по внешним датчикам.

2. Постановка задачи и цели

В рамках данной работы были поставлены следующие задачи:

- разработка прототипа алгоритма коррекции измерений ГНСС с использованием простой экстраполяции решения на целевых платформах ARM и x86 в рамках проекта RTKLIV для приемников серии Emlid Reach;
- разработка алгоритма коррекции измерений ГНСС с использованием одометрии на целевых платформах ARM и x86 в рамках проекта RTKLIV для приемников серии Emlid Reach;
- разработка метода продолжения решения при отсутствии сигнала спутников только на основе данных с одометра в рамках проекта RTKLIV;
- генерация искусственных данных формата RINEX [6] для произвольных траекторий;
- тестирование на искусственных данных;
- тестирование на реальных данных;
- анализ полученных результатов.

3. Обзор существующих решений

На данный момент доступны в основном решения для модулей с закрытым кодом. Многие компании предоставляют приемники уже с готовыми системами dead reckoning [9]. Основная проблема заключается в цене, закрытости кода и неуниверсальности реализации. Есть работы по использованию дополнительных измерений в фильтре Калмана: с использованием компаса [1] и IMU-модуля, закрепленного на колесе [2] или же с использованием паркинг-камеры [8], а также комбинации различных сенсоров [5]. Основное количество реализаций затрагивает позиционирование роботов с использованием IMU-модуля (системы из нескольких гироскопов и акселерометров).

У этих решений есть следующие недостатки:

- высокая вычислительная сложность из-за необходимости включения измерений в фильтр Калмана;
- потребность в дополнительном оборудовании для обеспечения нужной точности;
- отсутствие реализаций в крупных открытых библиотеках для высокоточной навигации;
- неустойчивость к срывам фазы и пропаданию спутников.

Все эти методы не корректируют напрямую измерения со спутников и не могут восстанавливать фазовые измерения, без которых успешное разрешение фазовой неопределенности невозможно. Такие решения подходят для уточнения float-решения в городских условиях, но они не обеспечивают устойчивого fix-решения. Также они не способны восстанавливать спутники во время кратковременных потерь сигнала.

4. Алгоритмы

За основу был взят open-source проект RTKLIV [7]. Это довольно развитый проект с большим сообществом. RTKLIV поддерживает множество семейств спутников и приемников. Приемники с открытым кодом стоят значительно дешевле, чем с проприетарным программным обеспечением.

Пакет предоставляет средства для получения и обработки сигналов с различных приемников, конвертирование, получение позиции в реальном времени, а также средства для пост-процессинга. Есть возможность обработки сигналов практически всех спутниковых систем и построение решения для разных типов позиционирования.

В библиотеке RTKLIV цикл расчета позиции выглядит следующим образом:

1. обработка бинарных данных с приемника во внутренние структуры;
2. итерации фильтра Калмана;
3. валидация решения на предмет разрешения фазовой неопределенности;
4. вывод решения.

4.1. Алгоритмы коррекции

Мой алгоритм состоит в коррекции и восстановлении измерений до фильтра Калмана для повышения устойчивости fix-решения. Для этого нужно устранить выбивающиеся измерения, полученные вследствие многолучевости, устранить срывы фазы, основываясь на позиции с одометрии и восстановить пропавшие спутники.

При отсутствии достаточного количества реальных данных с одометрии было решено реализовать прототип алгоритма коррекции измерений со спутников с использованием экстраполяции решения по точ-

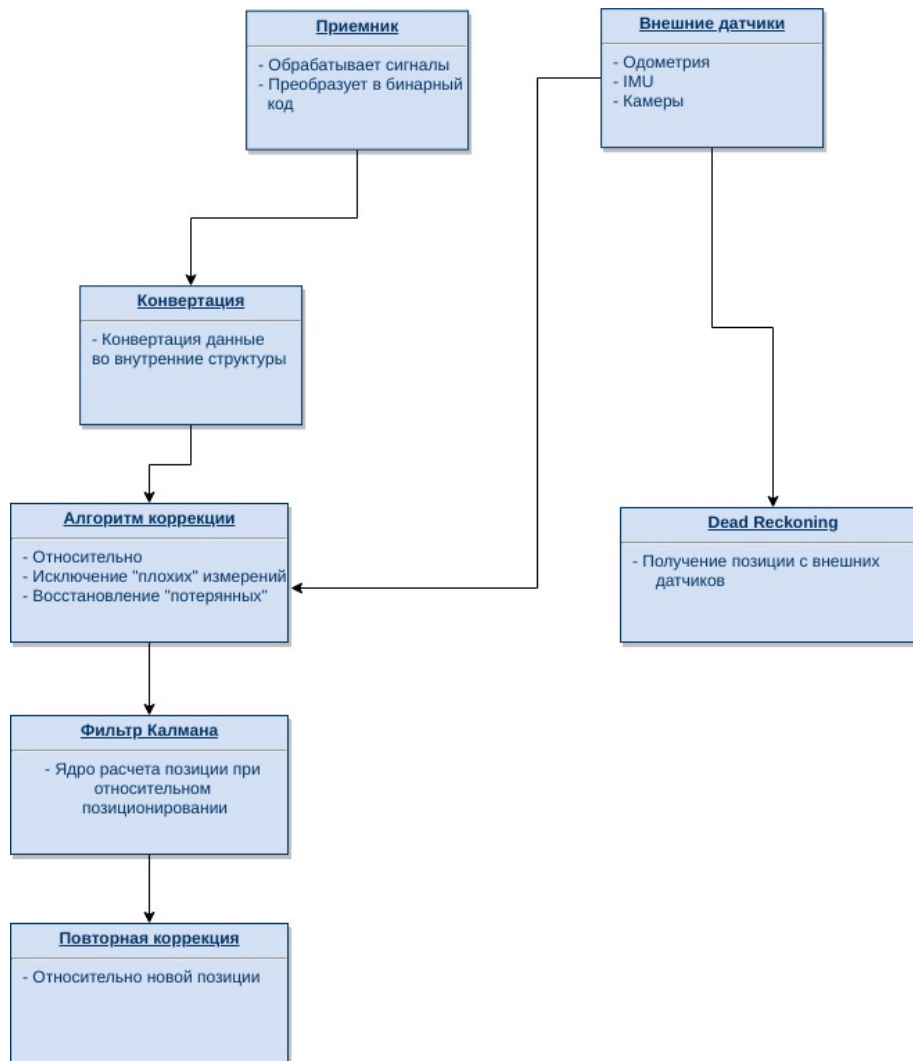


Рис. 1:
Общий вид алгоритма расчета позиции с предварительными коррекциями

кам fix-решения. Ввиду большой частоты измерений (5 Гц), предположения об относительно прямолинейном движении автомобиля в данном промежутке времени и низкого шума fix-решения экстраполяция проводится по двум точкам.

Алгоритм состоит из четырех фаз:

1. экстраполяция позиции;
2. пересчет измерений и/или корректировка заведомо ложных на основе измерений предыдущей эпохи относительно экстраполированной позиции;

3. восстановление пропавших измерений на основе измерений предыдущей эпохи относительно экстраполированной позиции;
4. повторение шагов 2) и 3) относительно позиции, полученной из фильтра Калмана.

Финальная версия алгоритма отличается от прототипа лишь заменой шага 1) на получение позиции по одометрии.

4.2. Dead Reckoning

При полной потере связи со спутниками можно поступить двумя разными способами.

Первый и наиболее простой - продолжать расчет позиции с последней известной по одометрии. У этого подхода есть ряд недостатков, связанных с фильтром Калмана и разрешением неопределенности с фазовыми измерениями. В городских условиях проезд под мостом с кратковременной потерей fix-решения приводит к тому, что сходимость фильтра Калмана может занимать достаточно длительное время после потери сигнала.

Второй подход будет эмулировать на N эпох (точное число будет определено по результатам тестирования) получение измерений со спутников с использованием последних известных измерений и позиции, полученной по одометрии. Таким образом, при кратковременной потере измерений фильтр Калмана с большей вероятностью продолжает правильно разрешать фазовую неопределенность.

5. Тестирование

5.1. Генерация идеальных данных

Для увеличения тестовой базы нужно иметь инструмент для генерации динамических логов формата RINEX для большинства спутниковых систем. Существующее решение [3] не удовлетворяло требованиям, так как имело возможность генерировать только статические логи только со спутниками GPS.

Поэтому было решено написать свою реализацию. На вход программа получает набор файлов формата RINEX, специально подготовленная сборка библиотеки RTKLIB вычисляет все ошибки, которые учитываются в генерации новых файлов формата RINEX. Как можно увидеть на рисунке 2(а), после обработки такие треки имеют максимальные невязки по псевдодалности и фазовым измерениям по каждому порядку 0.1 сантиметра. Они служат в качестве референсных решений при сравнении.

5.2. Наложение шумов

Следующим шагом была реализация инструментов для наложения шумов, чтобы создать достаточную тестовую базу. Они имели возможность накладывать гауссовские шумы, удалять отдельные измерения, исключать спутники и эмулировать сдвиг часов приемника. Но тесты получались слабо похожими на реальные и поэтому был разработан метод, использующий невязки с реальных данных, который нормализует их и делит на короткие промежутки. При наложении шумов промежутки соединяются между собой в случайном порядке с окном сглаживания в 20 секунд.

Программе на вход подаются файлы формата RINEX, полученные на предыдущем шаге, конфигурации с нужными настройками для наложения шумов и на выходе мы имеем логи с нужными невязками по псевдодалности и фазовым измерениям. Пример невязок у искусственного лога можно увидеть на рисунке 2(б).

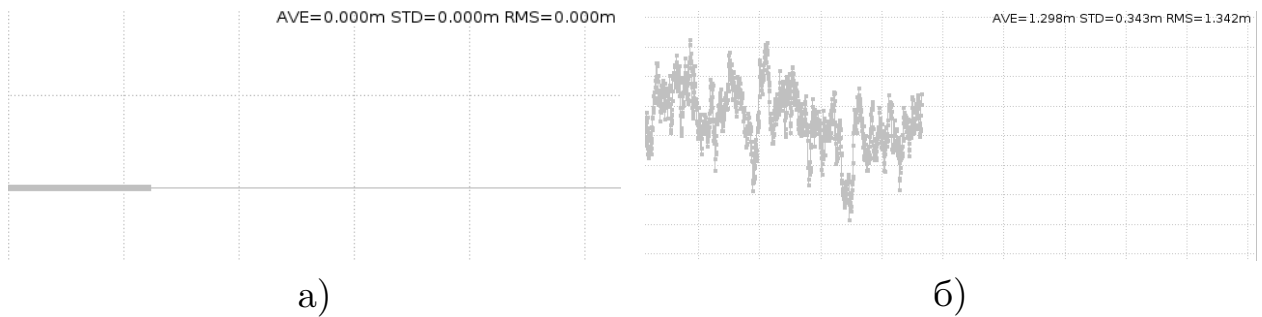


Рис. 2: Невязки идеального и зашумленного решения

6. Эксперимент

Для эксперимента были созданы 30 искусственных динамических тестов, а также взяты из базы 30 реальных тестов, где в качестве показаний одометрии были взяты референсные решения. Тест проводился в режиме пост-процессинга на сервере. На искусственные тесты накладывались семплированные шумы и выбивающиеся измерения по псевдодальности и фазовым невязкам. В качестве метрики бралось процент `fix` точек решения.

Сравнивались стандартная сборка `RTKLIB` и с новым алгоритмом коррекции измерений. Затем нашли выборочное среднее, дисперсию и дов. интервал для всех тестов. Доверительный интервал взят с доверительной вероятностью 0.99.

Результаты для точных `fix` решений.

Мат. ожидание (%)	Дисперсия	Доверительный интервал (%)
4.75	64.51	[2.06, 7.45]

Таким образом, алгоритм увеличивает количество `fix` решения, но требуется проверка на реальных данных.

7. Текущие результаты

Для нужд искусственного тестирования реализованы программы для генерации идеальных RINEX логов с использованием всех спутниковых систем (шум по фазе и псевдодальности не превышает 1 мм). Также была написана программа для наложения сэмплированных и случайных шумов, добавления срывов фазы. Проводятся работы по усовершенствованию возможностей этих двух программ. Программы адаптированы для запуска генерации множества тестов параллельно.

Для анализа результатов написана утилита, которая выполняет пост-процессинг большого количества логов и выдает результат в виде HTML-таблицы. В сводку входит среднее квадратическое отклонение от истинного решения, длина и количество fix-решения (наиболее нешумное решение, но близко к истинному при условии правильного разрешения фильтра Калмана), float-решения (обычное kinematic-решение), а также сравнение тех же самых логов на разных конфигурациях и сборках пакета RTKLIB. Эта утилита поможет качественно протестировать разрабатываемые алгоритмы до перехода к практике.

Были реализованы алгоритмы коррекции с использованием экстраполяции и одометрии и алгоритм продолжения решения при отсутствии измерений со спутников. Проверена работа на целевых платформах. Проведено тестирование алгоритмов коррекции на искусственных данных.

Заключение

Алгоритмы коррекции показали достаточное улучшение при расчете позиции. Dead Reckoning без эмуляции измерений спутников пригоден для работы при полном отсутствии спутникового сигнала на небольших расстояниях. Генератор логов, скрипты для генерации шумов, параллельного запуска и сбора статистики оформлены в отдельный, пока приватный, проект. Ведутся работы по написанию unit-тестов, расширению функционала, чтобы в будущем сделать проект открытым.

В будущем необходимо провести тестирование с реальными данными одометрии и унифицировать интерфейс получения измерений с внешних датчиков.

Список литературы

- [1] Alejandro J. Weinstein Kevin L. Moore. Pose Estimation of Ackerman Steering Vehicles for Outdoors Autonomous Navigation,.
- [2] Bernd Gersdorf Udo Frese. A Kalman Filter for Odometry using a Wheel Mounted Inertial Sensor.
- [3] Elsa Mohino Mauricio Gende Claudio Brunini Miguel Heraiz. SiGOG: Simulated GPS Observation Generator. — URL: <https://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/Mohino.htm>.
- [4] Liangliang Yang Dehua Gao Yohei Hoshino. Evaluation of the accuracy of an auto-navigation system for a tractor in mountain areas. — 2017. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8279201/>.
- [5] Mohammed Aftatah Abdelkabir Lahrech Abdelouahed Abounada. Fusion of GPS/INS/Odometer measurements for land vehicle navigation with GPS outage. — 2016. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7847724/>.
- [6] RINEX. The Receiver Independent Exchange Format. — URL: <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf>.
- [7] RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning. — URL: <http://rtklib.com>.
- [8] Steven Lovegrove Andrew J. Davison Javier Ibañez-Guzmán. Accurate visual odometry from a rear parking camera.
- [9] Wikipedia. Dead reckoning. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Dead_reckoning.