

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Астрономия
Астрометрия

Мазурин Константин Эдуардович

Построение сети опорных станций ГНСС

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., доцент Петров С.Д.

Рецензент:
к.ф.-м.н. Горшков В.Л.

Санкт-Петербург

2017

SAINT PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Astronomy

Astrometry

Konstantin Mazurin

Development of GNSS reference stations network

Graduation Project

Scientific supervisor:

Cand.Sci (Phys.-Math.), Assoc.Prof. Petrov S.D.

Reviewer:

Cand.Sci (Phys.-Math.) Gorshkov V.L.

Saint Petersburg

2017

Оглавление

Введение	2
1 Относительные методы определения координат по ГНСС измерениям	6
1.1 Общий принцип	6
1.2 Классический метод и RTK	8
1.3 Precise Point Positioning	12
1.4 Техническая реализация: RTCM и NTRIP	15
2 Построение сети	19
2.1 Примеры	19
2.2 Реализация NtripServer и NtripCaster	23
3 Применение	27
3.1 Движение ледников Антарктиды	27
3.2 Обработка файлов с наблюдениями	29
4 Заключение	35
Литература	36

Введение

ГНСС, или Глобальные Навигационные Спутниковые Системы, - это технология, получившая очень широкое распространение в последнее десятилетие. Системы GPS, ГЛОНАСС, а также быстро набирающие обороты Galileo (Европейский Союз) и BeiDou (Китай), постепенно становятся неотъемлемым атрибутом повседневной жизни современного человека, хотя задумывались первые две исключительно в военных целях. Сейчас ГНСС используются в различных отраслях жизнедеятельности человека. Военная и гражданская навигация, астрономия, геодинамика, сельское хозяйство, киноиндустрия - это лишь малая часть обширного списка.

В общем случае ГНСС состоит из нескольких основных компонентов: созвездия искусственных спутников Земли (ИСЗ), наземного сегмента, отвечающего за контроль и управление системой спутников, и аппаратуры потребителя ("спутниковых навигаторов"). Базовый принцип работы ГНСС достаточно прост. Для того, чтобы узнать свое местоположение, пользователь принимает радиосигналы, излучаемые спутниками. Сигнал от каждого спутника содержит его точные эфемериды (за это отвечает наземный сегмент) и дальномерный код. По времени распространения сигнала от спутника к приемнику вычисляется расстояние между ними. Получив сигналы от трех спутников (в реальности созвездия устроены так, что в каждый момент в любой точке планеты можно увидеть более 4 спутников), при помощи несложных вычислений приемник

получает свое положение в пространстве.

Разумеется, как и любое измерение, подобный метод подвержен влиянию ошибок. Основные помехи вносит атмосфера, замедляя идущий из космоса сигнал. К другим источникам помех можно отнести переотражение сигнала от различных объектов, неточное знание эфемерид спутников или поправки часов приемника. Иногда влияние этих ошибок может существенно исказить конечный результат. И если во многих повседневных задачах можно обойтись средней точностью измерения положения, составляющей $\approx 10\text{м}$, то в ряде научных и военных задач такой точности явно недостаточно. Для подобных целей существуют более точные методы, позволяющие повысить точность до $\approx 1\text{см}$, - DGNSS. Эти методы не ограничиваются использованием единичных ГНСС-приемников. Они используют т.н. сети базовых станций. В роли базовой станции (base station) выступает приемник, установленный в месте с хорошо известными координатами. Он проводит наблюдения спутников и вычисляет свое местоположение. По разнице вычисленных и известных заранее координат находятся поправки, которые в данном месте в данный момент влияют на результаты. После этого любой приемник, находящийся недалеко от данной базовой станции, - т.н. ровер (от англ. rover) - может получить поправки и, применив их к собственным измерениям, уточнить свои результаты. Важным допущением в данном методе является то, что поправки можно считать одинаковыми в пределах некоторой области вокруг базовой станции - порядка нескольких десятков километров.

На данный момент существует определенное количество подобных сетей, как международных, так и российских. Среди международных можно выделить IGS (International GNSS Service) - крупнейшую сеть из почти 500 станций, расположенных по всему миру, и EUREF Permanent GNSS Network - обширную

Европейскую сеть, в которую входит чуть больше 300 станций. К большому сожалению, доля российских станций в обеих сетях мала: в IGS их насчитывается около 20, а в EUREF - всего 4. В итоге жители России, за небольшим исключением, не имеют возможности пользоваться этими инструментами. В России также есть свои сети базовых станций. Наиболее известные из них: СмартНет, GeoSpider и Hive GNSS. Они обеспечивают хорошее покрытие Европейской части России (одна только Hive имеет в своем распоряжении около 400 станций), но у всех них есть один существенный недостаток - доступ к их данным платный. Помимо этого существует еще ряд проблем, связанных с этими сетями. К ним можно отнести закрытость исходных кодов ПО; невозможность автоматической загрузки данных; неравномерность расположения базовых станций - большая часть расположена вблизи Москвы и Санкт-Петербурга.

Целью данной выпускной квалификационной работы было создание прототипа подобной системы для отладки и дальнейшего применения в ряде научных задач. Коренным отличием проектируемой сети от упомянутых выше является ее бесплатность и доступность для любых пользователей. Также программное обеспечение будет полностью открытым, что позволит другим пользователям без особых проблем улучшать и модернизировать систему под свои нужды. В нашем распоряжении уже имеется некоторое количество ГНСС-приемников, расположенных на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области, которые могут быть использованы в качестве базовых станций. Стояла задача объединить их в сеть, т.е. настроить сбор и передачу ГНСС данных по протоколу NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), протестировать ее работу и, в случае успеха, воспользоваться ею при решении одной из задач, стоящих перед сотрудниками кафедры астрономии. В будущем мы планируем расширять сеть за счет подключения к ней новых базовых станций.

На данный момент мною были изучены возможности реализации данного проекта, был настроен сервер для приема, накопления и последующего распространения поправок, а также была написана программа, организующая сбор и передачу данных с базовой станции на данный сервер.

Глава 1

Относительные методы определения координат по ГНСС измерениям

1.1 Общий принцип

Как уже отмечалось ранее, даже современная точность определения координат единичным ГНСС приемником не может в полной мере соответствовать требованиям некоторых задач. Особенно остро эта проблема ощущалась в 90-х годах XX века, когда был включен режим SA (Selective Availability) - сигнал GPS искусственным образом искажался так, что погрешность определения координат обычными пользователями оказывалась на уровне 100м. Примерно в то же время стали предприниматься попытки создания методов дифференциальной навигации, основанных на совместной разностной обработке независимых измерений, полученных в разных точках. В основе данных методов лежат два соображения: 1) В точке с известными координатами возможно оценить суммарную ошибку ГНСС измерений и 2) Эти ошибки, полученные при наблюдении одного и того же спутника из разных точек, содержат в себе пространственно коррелированные составляющие, которые возможно скомпенсировать. [1] К их числу относятся: погрешности эфемерид и часов спутника, погрешности, вносимые в

сигнал при его прохождении через тропосферу и ионосферу, а также погрешности, вносимые режимом SA (в настоящий момент отключен). К ошибкам, присущим каждому конкретному пользователю, в следствии чего не поддающимся компенсации, относятся погрешности в аппаратуре пользователя и переотражение сигнала. Тем не менее, при наличии качественных двухчастотных приемников и наблюдениях в открытой местности, использование дифференциальной навигации способно увеличить точность измерений до 1м (кодовые измерения) или даже до 10см (фазовые измерения).

Теперь немного о том, как это реализуется на практике. Несмотря на множество различных вариантов построения систем дифференциальной навигации, у всех них есть общая черта - для получения точных результатов обработки наблюдений конечному потребителю необходимо обладать некоторой апостериорной информацией, принятой извне. Это могут быть скалярные или векторные поправки, уточненная эфемеридная информация, координаты и измерения других приемников.

Чаще всего для сбора и передачи этих данных используется одна или несколько станций, называемых базовыми, положение которых известно заранее с хорошей точностью. При этом точность координат базовых станций напрямую влияет на качество конечных результатов потребителя. Как правило базовые станции вписываются в существующие геодезические системы координат. Но также их положение можно определить, воспользовавшись ГНСС методами, например, PPP (Precise Point Positioning). Помимо этого, на точность определения координат пользователя влияет его удаленность от базовой станции. Поскольку дифференциальный режим, в числе прочих, призван устранить искажения, которые сигнал получает при прохождении через тропосферу и ионосферу, он будет тем эффективнее, чем более идентичными будут пути сигнала до базовой

станции и до пользователя. Оптимальной величиной базы - расстояния между базовой станцией и приемником потребителя, или ровером, - считается несколько десятков километров. Хотя теоретически можно работать и на большем удалении, вплоть до сотен километров. Несколько базовых станций, объединенных в сеть, могут обеспечить охват гораздо большей территории.

Также для функционирования систем дифференциальной навигации требуется канал связи, по которому данные с базовых станций будут передаваться пользователям. На заре существования подобных систем для этих целей использовались радиомодемы и ИСЗ. Сейчас все чаще на замену им приходят GSM сети и Интернет. Тем не менее, до сих пор некоторые широкозонные сети, такие как WAAS (Wide Area Augmentation System, США) и СДКМ (Система Дифференциальной Коррекции и Мониторинга, Россия), используют спутниковую связь для охвата большей территории.

Как уже было сказано, системы дифференциальной навигации могут быть реализованы совершенно по-разному. В настоящий момент наиболее широкое распространение получили два типа методов: дифференциальная коррекция, более известная как классический метод, и относительные измерения, среди которых самым используемым является RTK (Real-Time Kinematic).

1.2 Классический метод и RTK

Классический метод имеет основной своей целью повышение точности определения положения пользователя в абсолютной системе координат. Это достигается путем формирования на базовых станциях поправок, которые впоследствии рассылаются потребителям. Поправки могут передаваться как в скалярном виде (более простой и распространенный способ), так и в векторном. При использовании метода сбора и передачи скалярных поправок на базовой станции,

координаты которой заранее известны с высокой точностью, ставится высокоточный ГНСС-приемник. Он используется для измерения текущих навигационных параметров, например, псевдодальности. Одновременно с этим на основе известных координат станции высчитываются эталонные значения этих параметров, которые затем сравниваются с вычисленными. На основе полученных разностей и формируются поправки, рассылаемые потребителям. Потребители на основе этих поправок корректируют значения измеренных собственных навигационных параметров и получают уточненное местоположение. При этом важно отметить, что пересылаемые поправки учитывают все составляющие погрешности, содержащейся в сигнале. Аналогично описанному выше методу вместо псевдодальностей можно использовать и непосредственно коррекцию координат. Вычисленные на основе наблюдений координаты базовой станции сравниваются с эталонными, данная разность передается в виде поправок. Данный метод является самым простым, так как позволяет потребителю скорректировать уже готовые результаты, прибавив к измеренным координатам поправки. С другой стороны, в этом методе есть ряд ограничений. Базовая станция и потребитель должны наблюдать одно и то же созвездие спутников и при этом использовать одни и те же алгоритмы для расчета координат.

Важно отметить, что положение спутников в пространстве непрерывно меняется, следовательно, величина поправок будет меняться вместе с ним. Поэтому необходимо, чтобы базовые станции работали непрерывно и регулярно обновляли рассылаемые поправки. Пользователи имеют возможность работать в двух режимах: постобработки и в режиме реального времени. В первом случае поправки с базовых станций накапливаются в каком-нибудь хранилище, откуда пользователи их могут в любой момент забрать для обработки проведенных ранее наблюдений. Во втором случае поправки передаются пользователям напря-

мую в режиме реального времени, чтобы они имели возможность использовать эти данные "на лету".

Системы дифференциальной навигации, использующие классический метод, можно условно разделить на три типа: локальные, региональные и широкозонные. Локальные системы используют одну базовую станцию с которой поправки передаются напрямую потребителям. Вследствие чего эффективно подобная система работает на очень ограниченной области радиусом не более нескольких сот километров. Региональные системы позволяют значительно увеличить размер упомянутой зоны за счет объединения нескольких базовых станций в сеть. Потребитель имеет возможность получать поправки одновременно с нескольких станций. Как правило обработка наблюдений в данном случае происходит в два этапа: сначала координаты потребителя определяются на основе поправок, принятых с каждой базовой станции отдельно. Затем полученные величины осредняются с учетом весов. Веса станциям присваиваются на основании удаленности от потребителя, так как более точные поправки приходят со станций, расположенных ближе. Широкозонные системы имеют несколько принципиальных отличий от описанных выше. В первую очередь, в них используются векторные поправки, компоненты которых соответствуют отдельным составляющим погрешности измерений. Это позволяет повысить точность при обработке. Также в подобные системы добавлено новое звено - центры управления. Базовые станции, собирая данные наблюдений, передают их в указанные центры, где формируются векторы поправок, включающие в себя ошибки эфемерид и часов спутников и параметры модели атмосферной задержки. Эти поправки затем могут рассылаться пользователям. Финальным важным отличием является использование спутникового канала связи для охвата большей территории.

Основным параметром, вычисляемым ГНСС-приемником, является псевдо-

дальность - расстояние до этого спутника. Она вычисляется путем сопоставления генерируемой внутри приемника псевдослучайной двоичной последовательности с аналогичной, содержащейся в сигнале, который приходит со спутника. Поскольку сигналу требуется время на то, чтобы пройти расстояние от излучателя до приемника, последовательности будут смещены друг относительно друга. Искусственно увеличивая задержку генерируемого в приемнике кода, можно добиться совпадения. Умножив полученную задержку на скорость света, потребитель находит расстояние до спутника, излучившего сигнал.

Очевидно, что точность аппаратуры потребителя напрямую зависит от возможности правильно сопоставлять сигналы (то есть сопоставлять пики у колебаний). Если допустить ошибку в 1%, то это приводит к погрешности в несколько метров при расчете псевдодальности, так как псевдослучайная последовательность генерируется на частоте 1.023 МГц. Само же несущее колебание, модулирующее код, имеет частоту 1575.42 МГц. Если измерять фазу несущей и допускать ту же ошибку в 1%, можно добиться уменьшения погрешности примерно в тысячу раз.

На измерениях фазы несущего колебания основан метод RTK. Базовая станция принимает сигнал со спутника, измеряет фазу несущей и передает эти данные потребителю. Потребитель, также измеряя фазу несущей, сравнивает свои данные с полученными. На основании этого он может с очень хорошей точностью рассчитать свое положение относительно базовой станции - т.н. вектор базы. Дальнейшая точность определения координат зависит, как и в классическом методе, от точности координат базовой станции.

Проведение фазовых измерений осложняет наличие т.н. фазовой неоднозначности. Сдвиг фазы (дробной части) одного сигнала относительно другого измерить достаточно просто. Намного сложнее понять, какое количество целых

длин волн содержится в разности хода сигналов (Параметр Фазовой Неоднозначности, ПФН). Для решения этой проблемы разработано множество различных методов, простейший из которых состоит в построении разностей величин, получаемых из наблюдений. В частности, для того, чтобы исключить ПФН, необходимо вычесть вторую разность, относящуюся к одному моменту времени, из второй разности на другой момент времени. Необходимо в течение этого временного интервала (на практике он составляет около получаса) вести непрерывные наблюдения спутников, измерения которых входят во вторые разности. В настоящее время используются преимущественно другие методы, но данная тема заслуживает отдельной исследовательской работы. Подробнее об этом можно найти в [1].

1.3 Precise Point Positioning

К методам дифференциальной навигации можно также отнести PPP, хотя его часто рассматривают и как абсолютный метод определения координат. В действительности, он, как и основной метод ГНСС, требует для обработки наблюдений лишь эфемериды и данные о часах спутников. Коренным отличием является то, что эту информацию приемник берет не со спутников, а извне (например, из какой-нибудь глобальной сети, реже - из наблюдений другого приемника). Таким образом, при обработке наблюдений потребитель использует уточненные данные об эфемеридах и часах спутников, что позволяет получить значительный выигрыш в точности - теоретически, менее одного сантиметра. Разумеется, такая точность не имеет смысла в случае, если другие погрешности вносят более значительные искажения в измерения. Поэтому при обработке приходящих сигналов в PPP используют множество моделей, учитывающих большое количество источников ошибок. К ним, помимо состояния ионосфе-

ры и тропосферы, относятся, например, различные приливные воздействия на приемник, различие в положениях фазового центра излучателя и центра масс спутника, набег фазы, гравитационная задержка сигнала и прочее.[3] Для достижения максимальной точности в PPP, помимо кодовых измерений, также используются фазовые. Вследствие этого также, как и в RTK, необходимо уметь разрешать фазовую неоднозначность.

Главным преимуществом данного метода является отсутствие зависимости наблюдений от положения базовых станций. Уточненные эфемериды едины для всех потребителей, наблюдающих данный спутник, поэтому конечному пользователю не обязательно быть в зоне охвата какой-либо сети для получения результата. По этой же причине можно сократить количество базовых станций в сравнении с методом RTK. Также, в отличие от RTK, координаты пользователя вычисляются в системе абсолютных координат (в которой заданы эфемериды спутника), а не в локальной системе базовой станции. Недостатком, безусловно, является необходимость правильного учета всех входящих в решение параметров. Малейшая ошибка приведет к резкой потере в качестве результатов. При этом, практически невозможно будет это заметить, так как решение все равно сойдется. Также, для достижения лучшего результата, требуется непрерывные наблюдения нескольких спутников в течение довольно продолжительного времени. Практика показывает, что для того, чтобы среднеквадратическая погрешность (СКП) оценок координат сошлась к приемлемому значению, требуется 1-2 часа непрерывных наблюдений. Это время будет расти, если проводить наблюдения плохого качества (разрывы сигнала, переотражение). Существует несколько способов увеличить скорость сходимости СКП: наблюдать большее количество спутников, в т.ч. различных ГНСС; увеличить точность компенсации геодезических эффектов; использовать дополнительную априорную

информацию и прочее. Одним из экспериментальных методов является RPP-RTK. Он основан на использовании высокоточных эфемерид и часов спутника, как в RPP, и результатов измерений региональных базовых станций, на основе которых с высокой точностью высчитываются параметры региональных моделей тропосферы, ионосферы и поправки, требуемые для разрешения фазовых неоднозначностей. По заявлению авторов, это позволяет значительно сократить время сходимости СКП, вплоть до нескольких секунд. [4]

При использовании RPP необходимо помнить, что координаты вычисляются в глобальной системе координат, не учитывающей подвижность тектонических плит. При заявленной точности метода этот факт может давать ощутимые поправки. Таким образом, местоположение, определяемое при помощи RPP, актуально только на данный момент. Также стоит с осторожностью пользоваться рассматриваемым методом на стыках файлов с эфемеридно-временной информацией, чтобы избежать чрезмерных погрешностей интерполяции и скачков поправок часов.

Сфер применения у RPP множество. Как уже было сказано, можно при помощи него определять координаты базовых станций, входящих в сеть дифференциальной навигации. Помимо этого, в первую очередь, данный метод применяют в тех случаях, когда нет возможности использовать другие дифференциальные методы. Например, в местах, удаленных от сетей базовых станций. Также часто его используют в высокоточном управлении сельскохозяйственной техникой, различных геодинамических, метеорологических и навигационных задачах.

1.4 Техническая реализация: RTCM и NTRIP

Для успешного функционирования любой глобальной системы всегда необходимо разработать стандарты, которым будут следовать ее компоненты. Для систем дифференциальной навигации одними из таковых являются RTCM и NTRIP.

RTCM - формат данных, разработанный одноименной организацией (Radio Technical Commission For Maritime Services). Он описывает сообщения и техники, необходимые для работы системы, использующей одну или несколько базовых станций. Также, по заявлениям разработчиков, новые версии данного формата способны дополняться для возможности работы с SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems) - системами, использующими ИСЗ для передачи данных. RTCM содержит в себе различные типы сообщений, которые способны удовлетворить требованиям любых задач, возникающих при использовании методов дифференциальной коррекции. Все сообщения объединены в группы, показанные в 1.1.

Как сказано в [7], любая система должна поддерживать минимум одно сообщения из каждой группы. Информацию о назначении сообщений, а также об их структуре, можно найти в [7].

Ntrip (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) - протокол передачи данных внутри системы дифференциальной навигации. Он описывает обмен данными по сети Интернет и построен поверх повсеместно используемого HTTP/1.1 с добавлением дополнительного типа сообщений. В первую очередь предполагается использование протокола для передачи RTCM-поправок, но возможно использовать и иные типы данных. Ntrip реализован в виде трех программ: клиента (NtripClient), сервера (NtripServer) и кастера (NtripCaster).

Group Name	Sub-Group Name	Message Type
Observations	GPS L1	1001
		1002
	GPS L1 / L2	1003
		1004
	GLONASS L1	1009
		1010
	GLONASS L1 / L2	1011
		1012
Station Coordinates		1005
		1006
Antenna Description		1007
		1008
Network RTK Corrections	Network Auxiliary Station Data Message	1014
	Ionospheric Correction Differences	1015
	Geometric Correction Differences	1016
	Combined Geometric and Ionospheric Correction Differences	1017
Auxiliary Operation Information	System Parameters	1013
	Satellite Ephemeris Data	1019
		1020
	Unicode Text String	1029
Proprietary Information		Currently assigned message numbers 4088 – 4095

Рис. 1.1: Группы сообщений в RTCM.

Первые два являются HTTP клиентами, тогда как последний - HTTP сервером. Также в Ntrip входит еще один компонент - NtripSource.

В качестве NtripSource выступает стационарный ГНСС приемник - базовая станция. На ней происходит непрерывный сбор навигационных данных, которые затем поступают на NtripServer. Там из них формируется поток, который передается на главный компонент системы - NtripCaster. Затем эти данные становятся доступны различным конечным пользователям (NtripClients). На Сервере для каждого связанного с ним Источника вводится специальный идентификатор, который называется mountpoint. Различные Клиенты могут получить доступ к данным Источника, запросив их по mountpoint у Кастера. У пользователей всегда есть возможность выбрать Источник, с которого они будут получать данные. Для этой цели в Кастере реализована таблица источников (source-

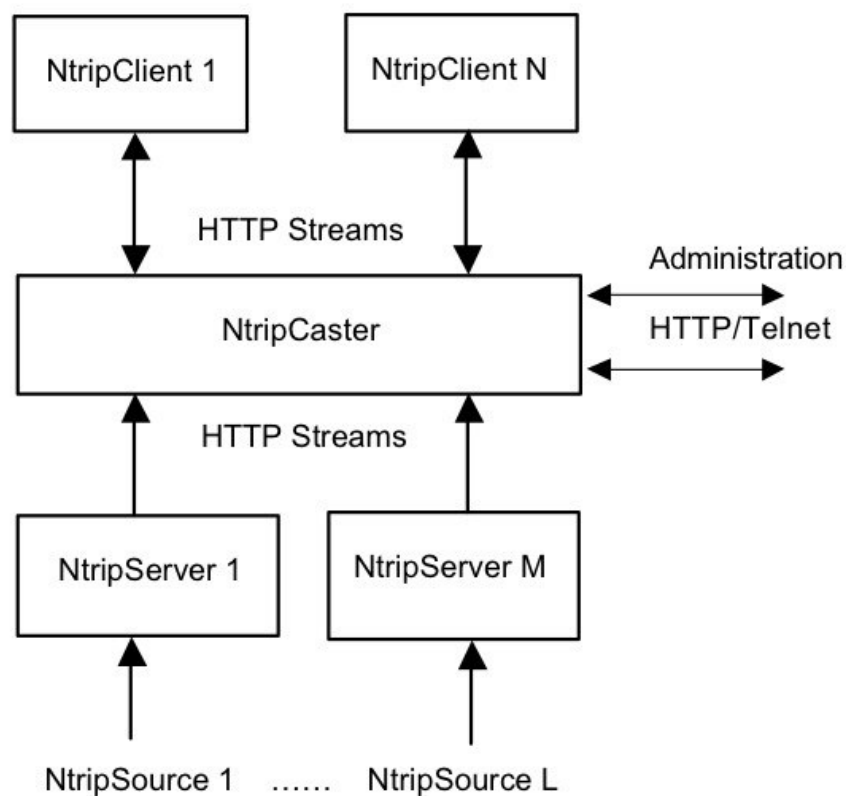


Рис. 1.2: Схема взаимодействия компонентов в Ntrip.

table). Каждая запись в ней содержит различные параметры потока данных от Источника, такие как mountpoint, координаты станции, формат, навигационная система, и т.д. Эти параметры задаются для каждого Источника на Сервере, с которым тот связан. Если клиент, запрашивая данные, посылает на Кастер неправильное значение mountpoint или не посылает его вовсе, то вместе ГНСС данных Кастер шлет в ответе актуальную таблицу источников, благодаря чему Клиент может сформировать новый запрос. Администратор, ответственный за Кастер, может позволять Серверам подключаться с новыми Источниками. Перед тем, как посылать данные, Сервер должен отправить запрос на Кастер, в котором будет указан mountpoint и пароль. Оба эти параметра определяются администратором Кастера и заранее передаются администратору Сервера, например посредством электронной почты. Клиент, желающий получить данные

с Кастера, в запросе должен указать mountpoint и, если того требуют настройки Источника, логин-пароль в зашифрованном виде для получения доступа к данным. Если mountpoint указан верно и Клиент проходит аутентификацию, начинается трансляция поправок в режиме реального времени. Некоторые Кастеры также имеют возможность хранить полученные от Источников данные для того, чтобы Клиенты могли ими воспользоваться для постобработки. Как правило для этого используется ftp-сервер, к которому может подключиться любой желающий. Там данные хранятся таким образом, чтобы можно легко получить поправки от желаемой станции на желаемую дату. Чаще всего данные хранятся в распространенном формате RINEX. Среди преимуществ данного протокола можно отметить:

- Он основан на популярном стандарте HTTP, что делает его простым в реализации и использовании;
- Независимость от типа данных: можно передавать ГНСС данные любого формата;
- Массовость: возможность одновременной передачи поправок множеству пользователей (с использованием технологии Интернет радио);
- Обеспечение безопасности: поставщик и приемник поправок часто не вступают в контакт друг с другом. Поправки не блокируются фаерволом.

Глава 2

Построение сети

2.1 Примеры

Как уже было отмечено ранее, разнообразие вариантов построения систем дифференциальной навигации велико. Соответственно, существует множество уже готовых и функционирующих систем и программных продуктов в этой области. Ниже будут кратко рассмотрены некоторые из них.

В первую очередь стоило бы начать с систем SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems). Среди них наиболее яркими представителями являются уже упомянутые ранее WAAS и СДКМ, а также европейская EGNOS, японская MSAS и индийская GAGAN. Эти широкозонные системы дифференциальной коррекции для охвата значительной территории используют ИСЗ, которые транслируют поправки пользователям. В этом заключается их ключевой недостаток: пользователям указанных сетей необходимо обладать достаточно серьезной аппаратурой, способной принимать сигналы этих сетей. В приемники массового производства такая опция не включена. В одно время в СДКМ вводили возможность передачи поправок по сети Интернет. В данный момент это используется лишь для режима постобработки; приоритет остается за спутниковым каналом связи.

Более удобным и доступным для пользователей вариантом является использование протокола NTRIP. На нем основано множество сетей по всему миру. Ниже представлена карта с изображением базовых станций, работающих по NTRIP. Разумеется, на нее нанесены далеко не все.

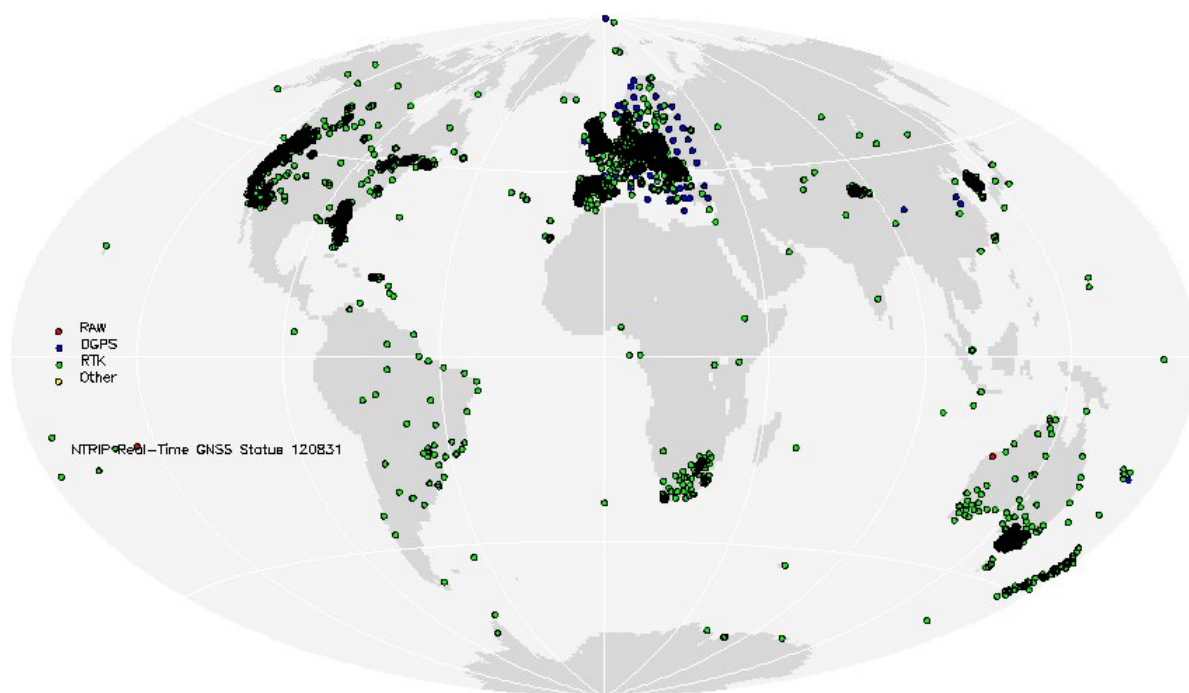


Рис. 2.1: Распределение базовых станций.

Большинство европейских станций принадлежат к сетям IGS (<https://www.igs-ip.net/home>) и EUREF (<http://www.euref-ip.net/home>). На территории Европы эти сети обеспечивают прекрасное покрытие и высокоточные результаты. Но в России эти сети представлены лишь одной станцией, которая находится в Звенигороде и принадлежит к IGS. Безусловно, для работы на территории России этого недостаточно.

В нашей стране также существует ряд различных сетей базовых станций,

имеющих различный охват. Наилучшее покрытие обеспечивают Hive GNSS (<https://hive.geosystems.aero>) и EFT-CORS (<http://eft-cors.ru>). Обе в своем составе имеют порядка нескольких сотен станций, расположенных преимущественно в европейской части России, и регулярно вводят новые. И эти сети были бы идеальными, если бы не одно но: доступ к данным у них платный. Режим RTK у обеих стоит порядка 300 рублей в день. Доступ к RINEX файлам у Hive также платный: файлы с интервалом наблюдений в 5 секунд стоят несколько сотен рублей в день, а с интервалом в 1 секунду - несколько тысяч. EFT-CORS предоставляет доступ к RINEX бесплатно, но тут же обнаруживается другая проблема: для получения файла необходимо заполнить веб-форму. Таким образом, невозможно наладить автоматическую загрузку RINEX файлов. Этой же проблемой обладает и другая российская сеть - СВОЭВП (<http://www.glonass-svoevp.ru>). Также среди недостатков этой сети можно отметить закрытость информации: на сайте не было найдено ничего про базовые станции и используемые технологии. Но она по крайней мере бесплатная.

Всеми перечисленными выше недостатками обладает и ряд локальных сетей. На территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области это, к примеру, Сеть РС СПб (<http://ref.kgainfo.spb.ru>) и Геоспайдер (<http://geospider.ru>). Стоимость RTK у них может достигать 1000 рублей в день. Сводная таблица с изученными сетями приведена ниже.

Название сети	Описание	Ссылка
IGS	Крупная сеть базовых станций, работающая по всему миру. Насчитывает более 130 станций, большинство из которых находятся на территории Европы. Бесплатная.	https://www.igs-ip.net/home
EUREF Permanent Network	Еще одна крупная сеть, станции которой располагаются в Европе. В ее состав входит около 80 станций. Бесплатная.	http://www.euref-ip.net/home
Hive GNSS	Крупнейшая российская сеть базовых станций. Имеет около 400 станций, расположенных преимущественно в европейской части России. Платная. RTK - до 600 руб./сутки, RINEX - до 5000 руб./сутки	https://hive.geosystems.aero
EFT-CORS	Обширная российская сеть базовых станций, которых насчитывается несколько сотен. Предоставляет бесплатный доступ к RINEX. Трудно автоматизировать загрузку файлов. RTK платный - 300 руб./сутки.	http://eft-cors.ru
Smartnet	Российская сеть, имеющая в своем составе более 200 базовых станций. Поддерживается компанией Leica Geosystems. Платная. RTK - 400 руб./сутки, RINEX - от 2200 руб./месяц.	http://smartnet-ru.com
РС СПб	Локальная сеть базовых станций, расположенная на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Находится в ведении Комитета по градостроительству СПб. Включает в себя 10 станций. Платная. Информация о тарифах доступна только после регистрации.	http://ref.kgainfo.spb.ru
Геоспайдер	Локальная сеть базовых станций. Насчитывает несколько десятков базовых станций в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Платная. RTK - от 500 руб./сутки, RINEX - от 1000 руб./неделю	http://geospider.ru
Stonex	Одна из коммерческих сетей, использующая базовые станции и ПО собственного производства. Предоставляет возможность работать внутри сети СмартНет.	http://http://stonexpositioning.com/index.php/en/media-center/case-history/82-russia

Таким образом, был выявлен ряд недостатков существующих сетей дифференциальной коррекции, а именно: недоступность массовому пользователю, платный доступ к данным, закрытость программного обеспечения и информации о сети, невозможность автоматической загрузки данных. В связи с этим было принято решение реализовать собственную сеть, избавленную от перечисленных недостатков.

2.2 Реализация NtripServer и NtripCaster

Сеть сразу было решено делать на основе NTRIP, в связи с достоинствами данного протокола, описанными в предыдущей главе. Для функционирования NTRIP необходимы базовые станции (NtripSource), кастер (NtripCaster) и программы, обеспечивающие их взаимодействие (NtripServer). Первым делом встал вопрос об NtripServer. В большинстве современных дорогих приемников включена поддержка NTRIP. Таким образом, NtripServer встроен непосредственно в само оборудование. Но по-прежнему остаются и такие, в которых эта возможность не реализована. Для этого случая требуется использовать персональный компьютер: данные с приемников передаются на компьютер, на котором формируются сообщения, содержащие поправки. Далее эти сообщения передаются с компьютера на кастер. Некоторые ГНСС приемники используют специальные протоколы для "общения" с компьютерами. Среди них оборудование фирм Leica, Trimble и других. Данные фирмы разрабатывают собственные протоколы и продают программное обеспечение, способное с ними работать. Но к счастью также существует общепринятый открытый протокол SIRF, реализованный во многих устройствах.

Именно на основе этого протокола мною была написана программа, выполняющая функции NtripServer. Она подключается к ГНСС приемнику через COM-

порт и начинает получать от него навигационные сообщения в формате SiRF. Эти сообщения "на лету" преобразуются в более удобный для чтения формат. После того, как устанавливается успешный прием данных с устройства, происходит подключение к кастеру. Для подключения требуется отправить специальный HTTP-запрос *SOURCE password /mountpoint*. Оба эти параметра должны быть заранее заданы администратором кастера и внесены в соответствующие конфигурационные файлы на кастере. После того, как программа получает сообщение о том, что запрос введен правильно (в ответ на запрос должен прийти ответ *ICY 200 OK*), начинается передача модифицированных навигационных сообщений. Блок-схема данной программы приведена ниже.

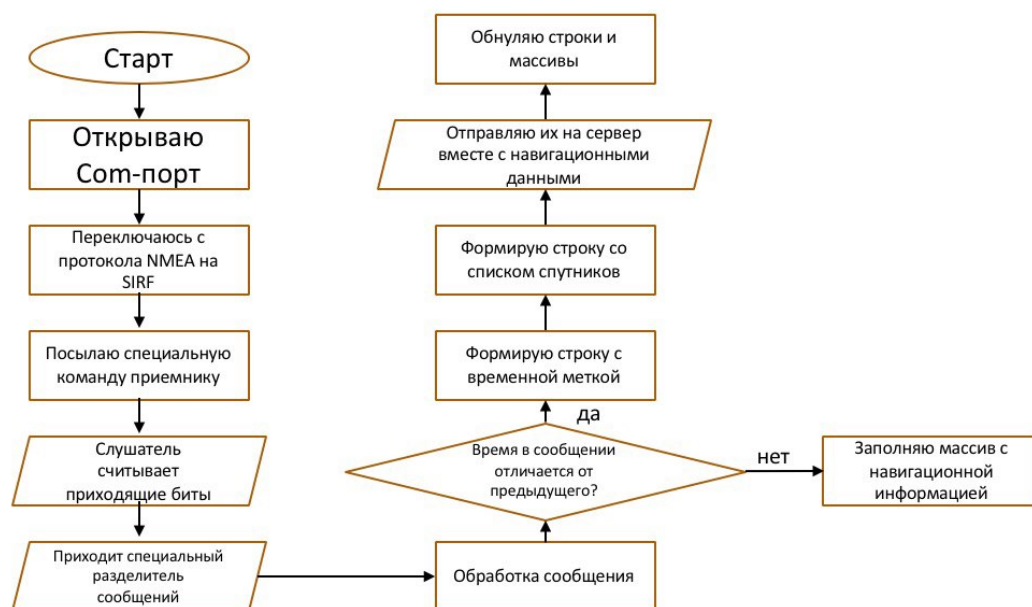


Рис. 2.2: Блок-схема реализованного NtripServer.

Проверка того, что программа работает правильно, заключалась в имитации действий Ntrip-клиента. Для этого можно воспользоваться простой telnet сессией. Подключившись к кастеру по имени хоста и номеру порта, следует отправить HTTP-запрос *GET /mountpoint HTTP/1.0*. В случае, если не требуется прохождение авторизации пользователем (такая опция задается на кастере для

каждого отдельного mountpoint), в ответ на запрос приходит *ICY 200 OK* после чего следуют сами навигационные сообщения. В случае, если предусмотрена авторизация, придет ответ *HTTP/1.0 401 Unauthorized*. В таком случае следует отправить на кастер новый *GET* запрос, дополнив его строчкой: *Authorization: Basic <base64 coded string user:password>*. Логин и пароль задаются на кастере администратором. Также стоит отметить, что в случае, если клиент ошибся в названии mountpoint или вовсе не указал его в запросе, в ответ придет сообщение *SOURCETABLE 200 OK*, после которого будет передана таблица с источниками.

Кастер было решено развернуть на имеющемся в распоряжении кафедры сервере gnss.ru.ru. Изначально планировалось использовать какое-нибудь готовое решение. Но оказалось, что большинство существующих кастеров либо платные (например, от ВКГ - Агентства Геодезии и Картографии, Германия - стоит €1000), либо не удовлетворяют поставленным требованиям (реализованы под Windows или не имеют возможности записи RINEX-файлов). Сводная таблица с найденными кастерами приведена ниже.

Название	Описание	Ссылка
BKG ntrip caster	Кастер, разработанный немецким Агентством Геодезии и Картографии. Он обладает серьезной функциональностью и используется в крупнейших сетях базовых станций, таких как IGS и EUREF. Платный, стоит €1000	https://igs.bkg.bund.de/ntrip/bkgcaster
Lefebure ntrip caster	Простой в использовании Ntrip кастер. Написан под Windows, бесплатный. Обладает несколько урезанной функциональностью, например, не способен сохранять RINEX файлы. Устарел	http://lefebure.com/software/ntripcaster
SNIP	Недавно разработанный кастер. На данный момент имеется версия под Windows и тестируется версия под Ubuntu. Доступен в трех вариантах: Lite (free), Basic (\$495), Pro (\$2495). Указанные варианты отличаются по функциональности	https://use-snip.com
Standard Ntrip Broadcaster	Open-source кастер, написанный под Linux на языке C. Не имеет интерфейса, работа осуществляется в командной строке. Не способен сохранять RINEX файлы	https://github.com/nunojpg/ntripcaster
Leica GNSS Spider	Один из многих коммерческих продуктов, поддерживающих Ntrip. Имеет закрытый код, платный. Найти цену не удалось.	http://leica-geosystems.com/products/.../leica-gnss-spider

На данный момент используется предпоследний кастер из таблицы. Для записи RINEX файлов на ftp-сервер используется программа rctm3torinex, реализованная упомянутым выше BKG. В будущем планируется объединить две эти программы, так как они обе находятся в открытом доступе. К кастеру успешно подключена станция в Агалатово. Данные в формате RTCM передаются на gnss.ru.ru, где они становятся доступными как в формате RINEX, так и в режиме реального времени.

Глава 3

Применение

В данной главе будет рассмотрен один из вариантов использования данных, предоставляемых сетью базовых ГНСС станций. Как уже неоднократно отмечалось выше, помимо режима RTK (работа в реальном времени) пользователям доступен режим постобработки. Для этого на кастере накапливаются RINEX-файлы, которые клиент может загрузить, например, воспользовавшись протоколом ftp. Обработав эти файлы, можно решить широкий спектр задач.

Мною было исследовано движение ледников в Антарктиде путем измерения скорости изменения координат ГНСС приемника, расположенного на станции Восток. Данный приемник, в силу особенностей расположения, не поддерживает протокол Ntrip, а следовательно, наблюдения с него были получены иным способом. Но тем не менее этот пример ярко иллюстрирует возможности использования RINEX-файлов для научных исследований.

3.1 Движение ледников Антарктиды

Как известно, Антарктида практически целиком покрыта льдом. Если быть более точным, то 98% её поверхности составляет Антарктический ледяной щит - крупнейшее скопление льда на Земле. Его объем составляет около 30 млн км³.

Ледяной щит имеет сложное строение. Основной его частью является Восточно-антарктический ледяной щит, чья площадь равна 10 млн км². Второй по величине - Западный ледяной щит с площадью около 2 млн км². Континент имеет форму купола, чья крутизна увеличивается к побережью, где расположено множество шельфовых ледников. Крупнейшие из них - ледники Росса и Ронне-Фильхнера. Средняя толщина льда Антарктиды составляет 2500-2800 м, а в некоторых местах может достигать отметки в 4800 м. При этом на границах Антарктиды толщина редко превышает 200 м. Накопление льда на щите приводит к движению масс льда в зону разрушения (абляции) - на периферию, где лед откалывается в виде айсбергов. Годовой объем абляции может достигать 2500 км³. Лед распространяется из нескольких центров к границе материка. Скорость потоков варьируется от нуля до сотен метров в год. Рекордная скорость составила почти 1500 км/год. Лед может погружаться в открытый океан, но чаще всего он впадает в шельфовые ледники.

Движение масс в Антарктиде является объектом изучения многих научных организаций. Для этой цели NASA запускало спутник ICESat (2003 - 2010) и готовит к запуску ICESat-2 (2018). Европейское космическое агентство также имеет спутник - Cryosat (2010). На борту этих спутников установлены высокоточные высотометры для отслеживания изменения высоты ледяного покрова. По результатам измерений составлены карты движения ледяных масс. Одна из них, полученная в результате работы проекта MEaSUREs [11], приведена ниже.

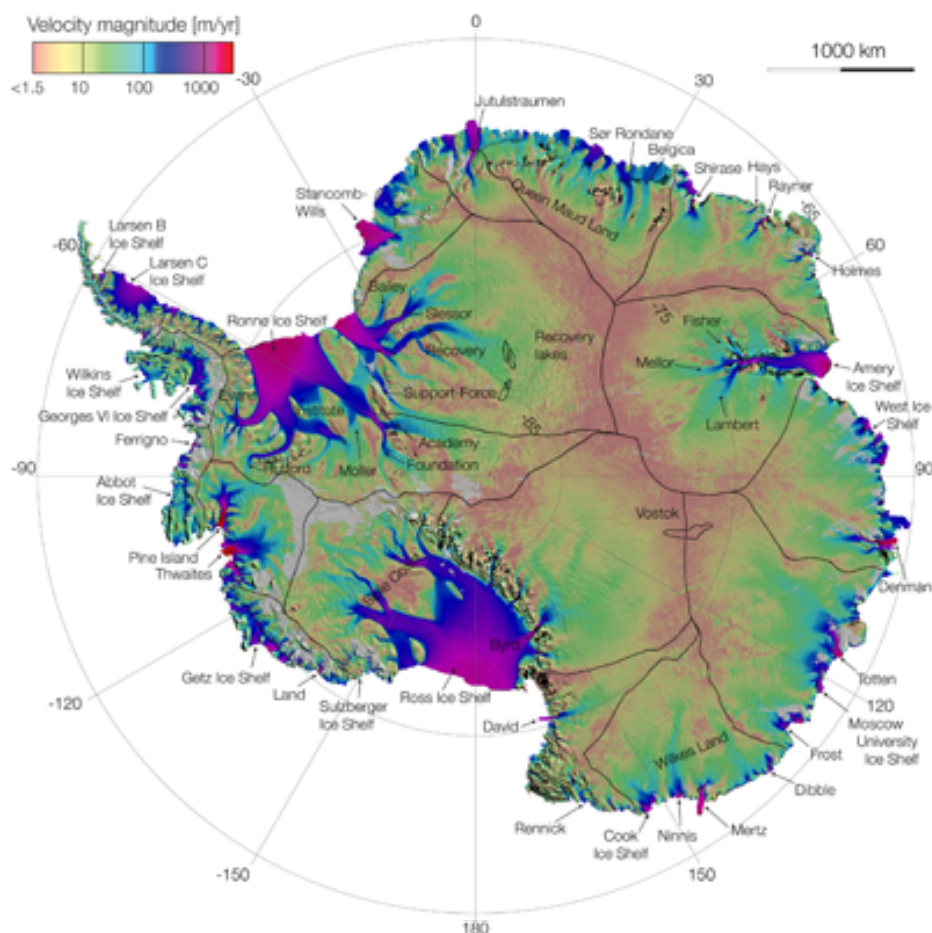


Рис. 3.1: Карта движения льда в Антарктиде.

На основании полученных со спутников данных можно построить достаточно точную картину относительных скоростей движения льда, но вот абсолютные скорости точно определить сложнее. Именно для этого и была проделана данная работа - путем обработки ГНСС измерений с хорошей точностью определяется скорость движения одной точки на поверхности материка, после чего относительным скоростям сопоставляются абсолютные значения.

3.2 Обработка файлов с наблюдениями

Файлы с наблюдениями со станции изначально имеют формат JPS - внутренний формат приемников фирмы JAVAD, один из которых и находится на станции Восток. В первую очередь требовалось преобразовать эти файлы в

формат RINEX. Существует несколько программ для осуществления этого, мною была выбрана программа TEQC (<https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>). В результате ее работы получилось порядка 360 RINEX-файлов - по одному на каждый день наблюдений. Обработывались данные, полученные с февраля 2016 года по январь 2017 года. Далее полученные файлы требовалось обработать, используя метод Precise Point Positioning. Для этой цели замечательно подходит программный пакет GIPSY (<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov>). Это очень мощный инструмент для обработки различных навигационных измерений. Подробнее о нем можно найти в [9]. Как было отмечено в п.1.3, для использования метода PPP необходимо иметь достаточно много дополнительной информации. К ней относятся эфемериды спутников, модели тропосферы и ионосферы. Все это заранее загружается со специализированных ресурсов (к примеру, эфемериды спутников загружаются с ftp-сервера IGS). Далее происходит сама обработка. Детали описаны в [10]. На выходе получаются по два файла на каждые сутки наблюдений: в одном содержатся координаты станции и их ошибки, в другом - широта, долгота и высота станции.

В итоге для демонстрации движения станции мною были построены графики изменения получившихся величин. Также была вычислена скорость движения станции. Стоит отметить, что при обработке RINEX-файлов программой GIPSY не были получены результаты для двух промежутков времени: с 18 мая по 24 июня и с 31 октября по 7 декабря. Программа выдавала ошибки. Вероятно, это было связано с тем, что RINEX-файлы содержали некорректную информацию. А это, в свою очередь, можно связать с возможными климатическими факторами - ведь в июле, например, в Антарктиде глубокая зима и экстремальные погодные условия. При этом, как будет видно из графиков, пропущенные

промежутки не повлияли на общий вид результатов. Второй момент, который также необходимо отметить - это то, что в графики и расчет скорости не попали данные, полученные в январе 2017 года. Они слишком сильно выбиваются из общей картины, а местами просто некорректные (высота станции отрицательная). Поэтому было принято решение их не учитывать. Итоговые графики представлены ниже.

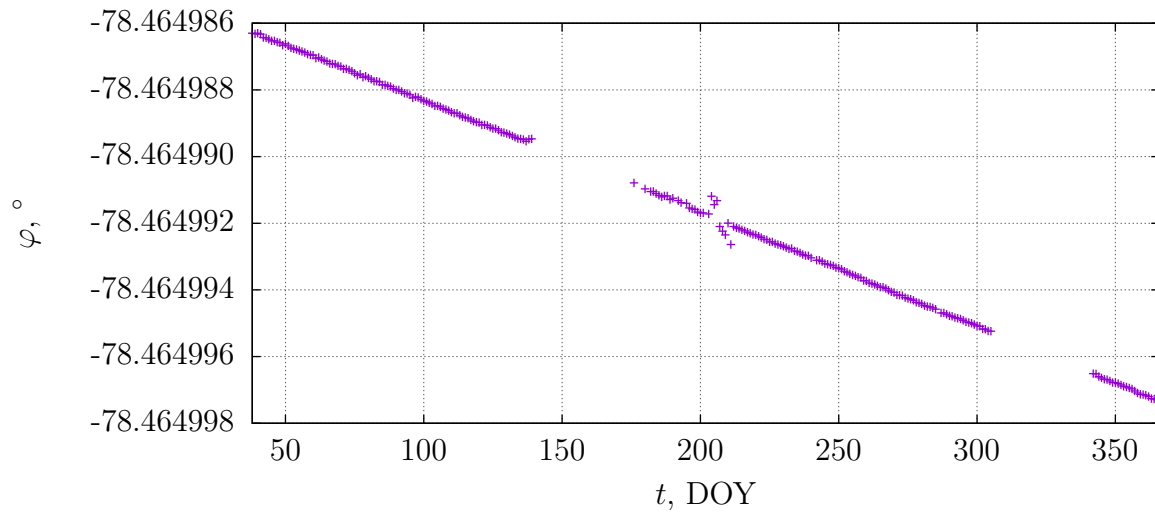


Рис. 3.2: Широта станции Восток в 2016 году

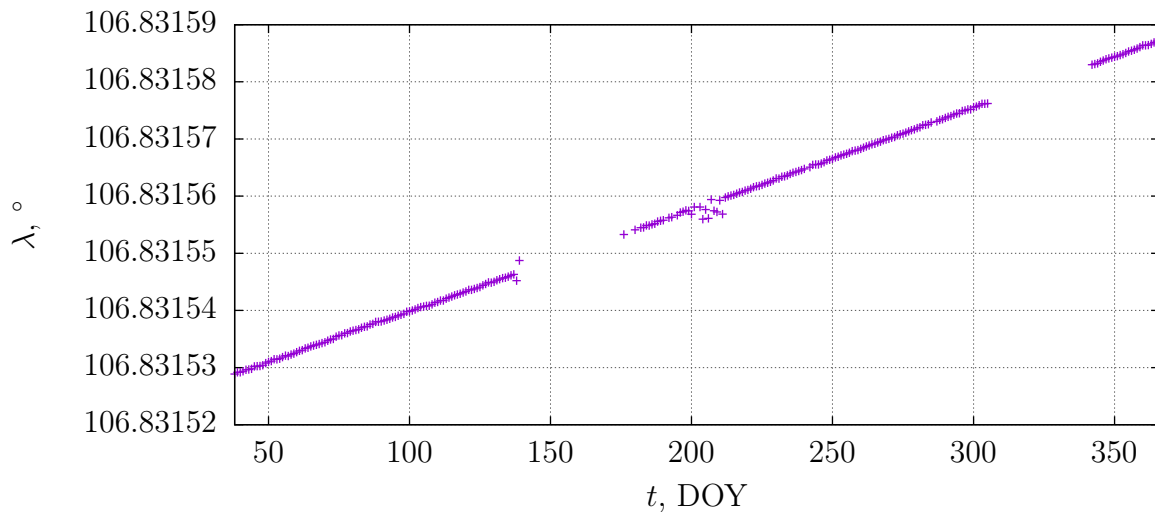


Рис. 3.3: Долгота станции Восток в 2016 году

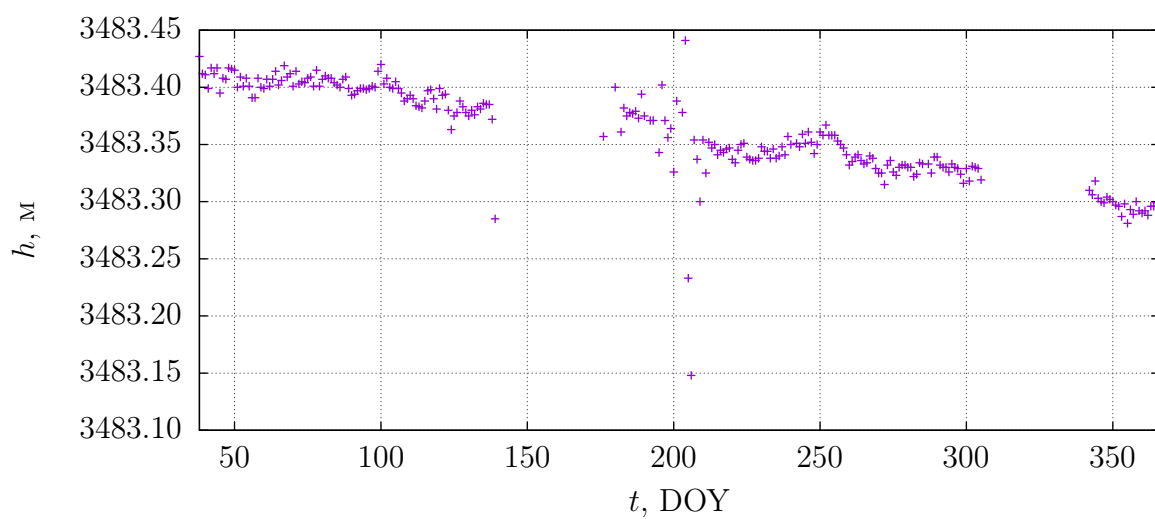
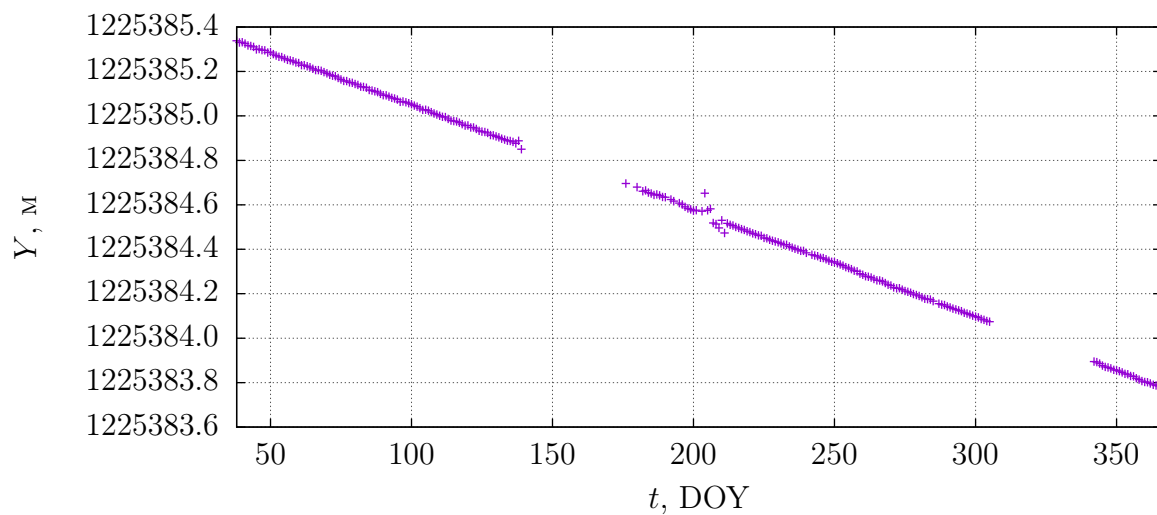
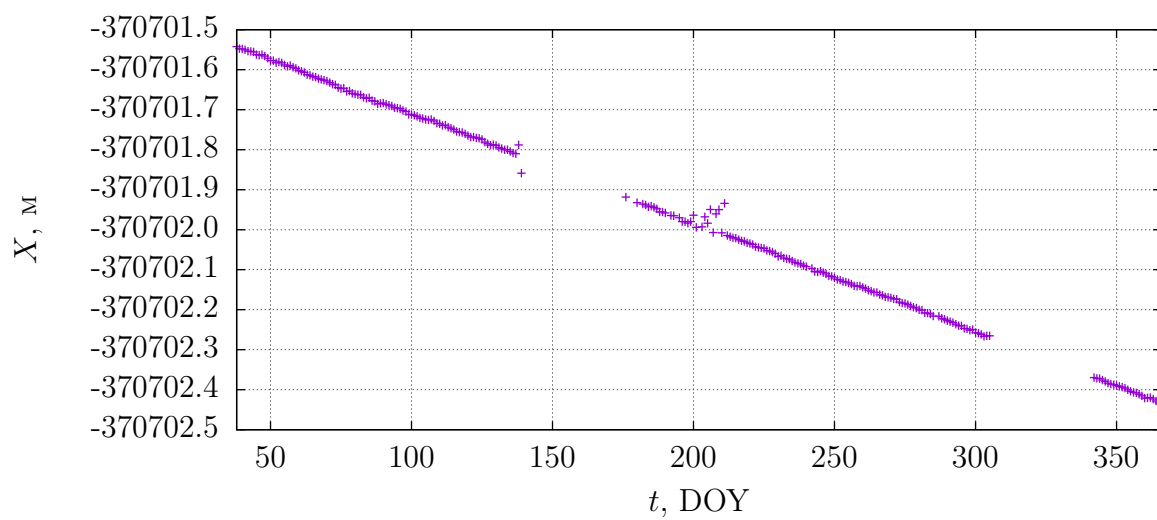


Рис. 3.4: Высота станции Восток в 2016 году



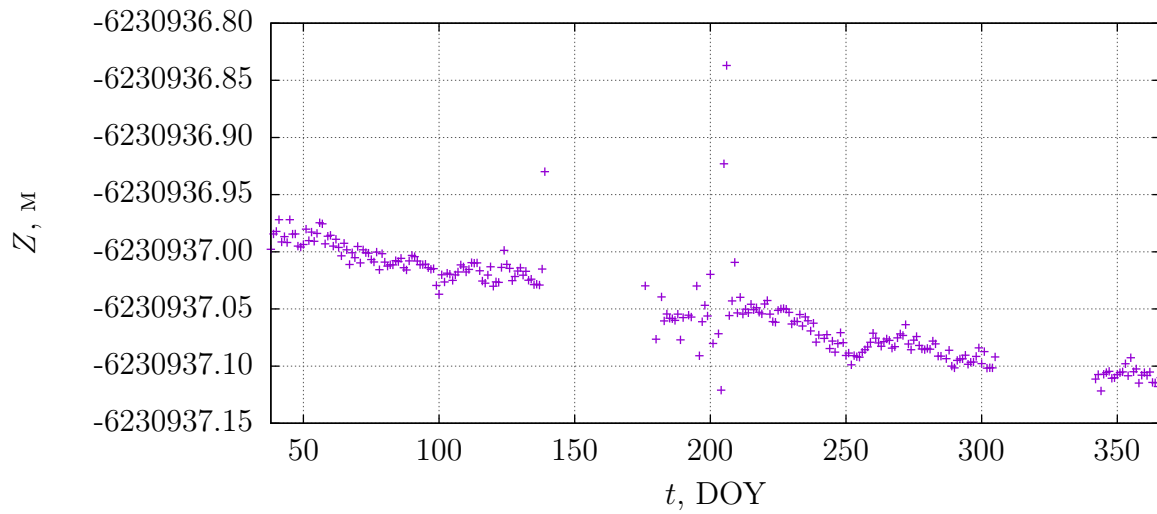


Рис. 3.5: Координаты станции Восток в 2016 году

Как видно из графиков, наблюдается ярко-выраженное движение станции в плоскости экватора (плоскость ХУ), а также по широте и долготе. Скорость изменения широты составляет $\approx 1.23 * 10^{-5}$ градусов в год, что соответствует ≈ 1.367 м/год в направлении полюса. Скорость изменения долготы составляет $\approx 6.49 * 10^{-5}$ градусов в год, что соответствует ≈ 1.444 м/год в направлении востока. В итоге скорость движения станции Восток получается равной ≈ 1.988 м/год. Приблизительное направление отмечено на карте ниже.



Рис. 3.6: Ориентировочное направление движения станции Восток.

Как видно, участок суши, на котором располагается станция, движется в направлении шельфового ледника Росса, что в первом приближении подтверждает корректность полученных результатов.

Также, глядя на графики, можно заметить изменение высоты станции. При этом, помимо периодических и случайных компонентов, в этом изменении присутствует и заметный тренд. За год высота станции уменьшилась по грубым оценкам на 10 см. Вероятнее всего, это можно связать с уменьшением толщины ледяного покрова в районе станции.

Глава 4

Заключение

Системы дифференциальной навигации являются важным инструментом для повышения точности ГНСС измерений, и, как следствие, расширения круга решаемых задач. Нам удалось создать прототип работающей сети, способной выполнять свои основные функции: передачу поправок в режиме реального времени и накопление навигационных файлов для дальнейшего использования. Также хорошо видны дальнейшие способы развития данной сети: подключение новых базовых станций, модернизация программного обеспечения, доработка веб-интерфейса для облегчения доступа к администрированию.

После того, как будут добавлены новые станции, и сеть войдет в рабочий режим, ее можно будет использовать в различных задачах. Среди них сельскохозяйственные работы, уточнение координат опорных пунктов, различные геодезические задачи, автоматизация полетов беспилотных летательных аппаратов и многое другое. Одна из таких задач была рассмотрена в рамках данной работы. При помощи навигационных наблюдений и последующей обработки RINEX-файлов была найдена скорость движения станции Восток для того, чтобы уточнить картину движения ледяных масс в Антарктиде. Также было продемонстрировано уменьшение высоты станции, что может свидетельствовать об уменьшении толщины ледяного покрова на континенте.

Литература

- [1] С.Н.Карутин, И.Б.Власов, В.В.Дворкин, *Дифференциальная коррекция и мониторинг глобальных навигационных спутниковых систем*. Издательство Московского Университета, Москва, 2014.
- [2] E.Kaplan, C.Hegarty, *Understanding GPS: principles and applications*. Artech House, Massachusetts, 2nd edition, 2006.
- [3] С.Н.Карутин, *Высокоточное местопределение по сигналам глобально навигационной спутниковой системы с использованием уточненной эфемеридно- временной информации*. Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 2010.
- [4] G.Wübbena, M.Schmitz, A.Bagge, *PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks*. 2005.
- [5] В.Л.Горшков, А.В.Мохнаткин, С.С.Смирнов, С.Д.Петров, Д.А.Трофимов, Н.В.Щербакова, *Исследование геодинамики зоны сопряжения Балтийского щита с Восточно-Европейской платформой по данным ГНСС-наблюдений*. Вестник СПбГУ, Санкт-Петербург, 2015.
- [6] H.Gebhard, G.Weber, *Ntrip, Version 1.0. Design-Protocol-Software*. Federal Agency for Cartography and Geodesy, Frankfurt, 2003.

- [7] RTCM Special Committee No.104, *RTCM Standard 10403.1 for Differential GNSS Services - Version 3*. 2006.
- [8] SiRF Technology, Inc, *SiRF Binar Protocol Reference Manual*. 2008.
- [9] S.Desai, Da Kuang, W.Bertiger, *GIPSY/OASIS (GIPSY) Overview and Under the Hood*. Jet Propulsion Laboratory, 2014.
- [10] S.Desai, W.Bertiger, *Static and Kinematic Precise Point Positioning with gd2p.pl*. Jet Propulsion Laboratory, 2014.
- [11] Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl, *Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet*. Science, 2011.