

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи



Косарев Николай Сергеевич

Методика контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и
координатам пункта наблюдений

25.00.32 – Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Антонович Константин Михайлович

Новосибирск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ВИДЫ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ СВОЙСТВА. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	9
1.1 Модели ГНСС измерений.....	9
1.2 Разности фазовых ГНСС псевдодальностей.....	12
1.3 Линейные комбинации фазовых ГНСС псевдодальностей.....	15
1.4 Источники погрешностей фазовых ГНСС измерений.....	17
1.5 Погрешности измерений, связанные со спутником.....	18
1.6 Погрешности аппаратуры пользователя.....	21
1.7 Погрешности, вызываемые средой распространения сигнала.....	24
1.8 Погрешности в математической модели ГНСС измерений.....	27
1.9 Величина и скорость изменения атмосферных влияний и многолучевости.....	30
1.10 Методы ослабления влияний источников погрешностей.....	31
1.11 Обзор методов контроля фазовых ГНСС измерений.....	32
1.12 Постановка задач исследования	41
2 МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ФАЗОВЫХ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ ПО ЭФЕМЕРИДАМ СПУТНИКОВ И КООРДИНАТАМ ПУНКТА НАБЛЮДЕНИЙ.....	43
2.1 Обоснование применения первых разностей геометрических дальностей для контроля фазовых ГНСС измерений.....	43
2.2 Общие сведения о методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координата пункта наблюдений.....	48
2.3 Алгоритмы, используемые в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений.....	52
2.4 Методы фильтрации данных в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений.....	67
2.5 Выводы по второму разделу.....	72
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ФАЗОВЫХ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ ПО ЭФЕМЕРИДАМ СПУТНИКОВ И КООРДИНАТАМ ПУНКТА НАБЛЮДЕНИЙ.....	74
3.1 Программное обеспечение методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений.....	74
3.2 Имитационное моделирование с использованием скользящего среднего.....	82

3.3	Имитационное моделирование с использованием адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа.....	87
3.4	Проверка правильности работы методики и программного обеспечения по реальным данным.....	93
3.5	Применение методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений для исследования многолучевости и ионосферной дивергенции.....	101
3.6	Выводы по третьему разделу.....	111
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	133
	ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) АКТЫ ВНЕДРЕНИЙ.....	135
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС И GPS ПО БОРТОВОЙ ЭФЕМЕРИДНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	138
	ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА УЧЕТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХЧАСТОТНЫХ ФАЗОВЫХ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИЕМНИКОМ, ПОДКЛЮЧЕННЫМ К ВЫСОКОСТАБИЛЬНОМУ АТОМНОМУ СТАНДАРТУ ЧАСТОТЫ.....	140
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	144
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) НАСТРОЙКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА RTKPOST ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ PPP.....	145
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ОСТАВА_PPA...	148
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (обязательное) ОСТАТОЧНЫЕ РАЗНОСТИ МЕЖДУ ИЗМЕРЕННЫМИ И СМОДЕЛИРОВАННЫМИ ДАННЫМИ	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS активно используются при решении целого комплекса задач координатно-временного и навигационного обеспечения. В настоящее время ГНСС технологии применяются в геодезии для создания высокоточных государственных геодезических сетей (ФАГС, ВГС, СГС-1), сетей специального назначения на геодинамических полигонах, сетей активных базовых станций, а также в задачах глобальной геотектоники.

Высокая точность определения координат невозможна без выявления и устранения потерь счета циклов и разрешения целочисленной неоднозначности в фазовых ГНСС измерениях. Если для разрешения целочисленной неоднозначности уже предложено более двух десятков методов, то выявление, а главное, корректное восстановление отсчетов непрерывной фазы несущей все еще остается нерешенной проблемой, что приводит к снижению точности и увеличению продолжительности наблюдений. Поэтому обнаружение, исключение аномальных погрешностей и потерь счета циклов является актуальной задачей и требует разработки методики контроля фазовых ГНСС измерений.

Актуальность темы исследования подтверждается тем, что одним из направлений модернизации ГНСС приемников является оснащение их высокостабильными малогабаритными атомными стандартами частоты, которые уже активно используются в современном телекоммуникационном оборудовании. Предложенная методика контроля фазовых ГНСС измерений позволяет обеспечивать надежную предварительную обработку спутниковых данных.

Исследования по данной тематике соответствуют приоритетному направлению развития навигационной системы ГЛОНАСС в рамках федеральной целевой программы «Концепция развития ГЛОНАСС в 2012 – 2020 годы».

Степень разработанности темы. Важную роль в развитии методик контроля фазовых ГНСС измерений внесли следующие зарубежные и отечественные ученые: В. Remondi, G. Blewitt, S. B. Bisnath, P. A. Gross, A. Leick,

R. Langley, P. Teunissen, B. Hofmann-Wellenhof, W. Melbourne, G. Wübbena, C. Rizos, А. А. Жалило, А. П. Карпик, М. О. Кешин, К. М. Антонович, А. С. Толстиков, Е. Б. Ключин, А. К. Гречкосеев, А. М. Алешечкин, В. В. Щербаков

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений для выявления потерь счета циклов и аномальных погрешностей на этапе предварительной обработки данных.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *основные задачи*:

а) выполнить анализ существующих методов обнаружения и корректного исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов, выявить их основные достоинства и недостатки;

б) разработать методику контроля, включающую обнаружение и корректное исключение аномальных погрешностей и потерь счета циклов, фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений;

в) разработать математическую модель компенсации дифференциального влияния ионосферы для применения в методике контроля фазовых двухчастотных ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений на этапе фильтрации данных;

г) разработать адаптивную рекуррентную процедуру калмановского типа для обнаружения, исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов, которая будет применена в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений на этапе фильтрации данных;

д) выполнить экспериментальную проверку методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений средствами имитационного моделирования и на основе анализа реальных ГНСС измерений;

е) выработать рекомендации по дальнейшему развитию разработанной методики контроля фазовых ГНСС измерений.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

а) впервые разработана методика контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений для приемников с малогабаритными атомными стандартами частоты, которая позволяет корректно обнаруживать и исключать аномальные погрешности и потери счета циклов, что приводит к повышению точности обработки результатов спутниковых измерений по внутренней сходимости в 1,5 раза;

б) разработана математическая модель дифференциального влияния ионосферы, которая позволяет достоверно учитывать региональные особенности ионосферы с использованием разработанной методики контроля фазовых ГНСС измерений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость исследований заключается в дальнейшем развитии теории обработки ГЛОНАСС и GPS измерений, полученных с использованием ГНСС аппаратуры, оснащенной малогабаритными атомными стандартами частоты.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика контроля фазовых ГНСС измерений применялась для оценки качества измерительной информации, полученной в ходе экспериментальных работ по проекту Российского научного фонда № 14-27-00068 «Разработка фундаментальной теории, методов и алгоритмов координатно-временного и навигационного обеспечения для решения приоритетных государственных задач геодезии и дистанционного зондирования с учетом классических и релятивистских эффектов гравитационного поля Земли и других массивных тел Солнечной системы».

Методология и методы исследования. При выполнении исследований использовались теория математической обработки геодезических измерений, системный подход, методы численного интегрирования и математического

анализа. В качестве программного обеспечения использовались программы MathCad 14, Delphi 7, специализированный программный продукт обработки ГНСС измерений Topcon Tools версии 8.2.

Положения, выносимые на защиту:

а) использование первых разностей геометрических дальностей, вычисленных по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, в методике контроля фазовых ГНСС измерений обеспечивает корректное обнаружение и исключение аномальных погрешностей и потерь счета циклов на этапе предварительной обработки данных, полученных любым одиночным спутниковым приемником, оснащенным атомными часами;

б) математическая модель дифференциальной ионосферной задержки, применяемая в разработанной методике контроля фазовых ГНСС измерений по первым разностям спутниковых данных, позволяет уменьшить погрешности, вызванные влиянием ионосферы, без использования результатов самих измерений;

в) использование адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа обеспечивает повышение точности обработки спутниковых данных в $1,5 \div 2$ раза за счёт возможности обнаружения, исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов в процессе предварительной обработки ГНСС измерений. *Степень достоверности и апробация результатов.* Основные положения и результаты исследования докладывались и получили одобрение на следующих конгрессах и конференциях:

а) на VII–XI Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск, 2011–2015);

б) на 2-й Международной научно-технической конференции, посвященной 30-летию запуска на орбиту первого навигационного космического аппарата «ГЛОНАСС» (г. Железногорск, 2012);

в) на Международной конференции «Интеграция данных наблюдений по маркам и за объектами в целом при геодезическом мониторинге инженерных сооружений и природных объектов» (г. Новосибирск, 2014);

г) на Международной научно-технической конференции «Геодезия, картография, кадастр – современность и перспективы», посвященной 235-летию основания МИИГАиК (г. Москва, 2014);

д) на 10-й Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (г. Москва, 2014);

е) на 26 Ассамблее Международного сообщества Геодезии и Геофизики IUGG-2015 (г. Прага, Чехия, 2015).

Исследования выполнялись в рамках госбюджетной научной исследовательской работы, регистрационный номер 1527 (1.3.14) «Разработка принципов и методологических основ навигации подвижных объектов с использованием наземной инфраструктуры ГЛОНАСС».

Результаты исследований внедрены в учебный процесс СГУГиТ и использовались в метрологической службе СГУГиТ при построении геодезической сети Эталонного пространственного полигона СГУГиТ, в геодезической компании ООО «Запсибгеодезия» (город Новосибирск) при построении метрологического пространственного полигона в городе Тюмени.

Автор выражает благодарность канд. техн. наук Жалило А. А. за неоценимую помощь и постоянное внимание к работе, канд. техн. наук. Шевчуку С. О. за участие в экспериментальных работах, докт. техн. наук Толстикovu А. С. за консультации и обсуждение результатов исследований.

1 ВИДЫ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ СВОЙСТВА. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1 Модели ГНСС измерений

Сигналы, транслируемые спутниками ГНСС, имеют сложную структуру, состоящую из высокочастотных несущих волн L – диапазона, дальномерных кодов, которыми модулируются несущие волны, и навигационного сообщения.

Каждый приемник принимает эти сигналы, обрабатывает и преобразует их в доступную информацию. Для получения координат с помощью ГНСС технологий преимущественно используется два типа измерений: кодовая псевдодальность P и фаза несущей φ .

Уравнение кодовой псевдодальности можно представить как

$$P_{rec}^{sat} = c \cdot \Delta t_{rec}^{sat}, \quad (1.1)$$

где P_{rec}^{sat} – измеренная кодовая псевдодальность;

c – скорость света;

Δt_{rec}^{sat} – время прохождения сигнала от фазового центра антенны спутника (sat) до фазового центра антенны приемника (rec).

Время прохождения сигнала можно разделить на три составляющие: задержку в передаче сигнала на спутнике, время прохождения сигнала между передающей антенной спутника и принимающей антенной приемника, задержку в аппаратуре приемника [39].

Кодовую псевдодальность в формуле (1.1) обычно выражают через геометрическую дальность ρ и ряд поправок [111, 132]

$$P_{rec}^{sat} = \rho_{rec}^{sat} + cdt_{rec} - cdt^{sat} + T_{rec}^{sat} - I_{rec}^{sat} + d_{rec} + d^{sat} + dm^{sat} + dm_{rec} + e_{rec}^{sat}, \quad (1.2)$$

где P_{rec}^{sat} – измеренная кодовая псевдодальность;

ρ_{rec}^{sat} – геометрическая дальность, представляющая собой истинное расстояние между фазовым центром антенны спутника в момент выхода сигнала и фазовым центром антенны приемника в момент приема сигнала;

dt_{rec} – сдвиг шкалы часов приемника относительно шкалы системного времени;

dt^{sat} – сдвиг шкалы часов спутника относительно шкалы системного времени;

T_{rec}^{sat} – тропосферная задержка, выраженная в единицах длины;

I_{rec}^{sat} – ионосферная задержка, выраженная в единицах длины;

d_{rec} , d^{sat} – запаздывание в аппаратуре приемника и спутника;

dm^{sat} – погрешность, вызванная явлением многолучевости на спутнике;

dm_{rec} – погрешность, вызванная явлением многолучевости в окружении приемника;

e_{rec}^{sat} – шум измерения псевдодальности.

Геометрическую дальность можно вычислить по формуле

$$\rho_{rec}^{sat} = \sqrt{(x^{sat} - X_{rec})^2 + (y^{sat} - Y_{rec})^2 + (z^{sat} - Z_{rec})^2}, \quad (1.3)$$

где x^{sat} , y^{sat} , z^{sat} – координаты спутника в общеземной геоцентрической системе отсчета;

X_{rec} , Y_{rec} , Z_{rec} – координаты станции (пункта) наблюдения в этой же системе отсчета.

Измеренная фаза несущей φ_{rec}^{sat} в файле наблюдений представляется в циклах. Для получения линейной меры необходимо эту величину умножить на соответствующую длину волны λ

$$\Phi_{rec}^{sat} = \varphi_{rec}^{sat} \cdot \lambda, \quad (1.4)$$

где Φ_{rec}^{sat} – фазовая псевдодальность.

Для величины Φ_{rec}^{sat} можно записать следующее уравнение [111, 132]

$$\begin{aligned} \Phi_{rec}^{sat} = & \rho_{rec}^{sat} + cdt_{rec} - cdt^{sat} + T_{rec}^{sat} - I_{rec}^{sat} + \delta_{rec} + \delta^{sat} + \lambda \cdot N_{rec}^{sat} + \delta m^{sat} + \\ & + \delta m_{rec} + \lambda \cdot \left[(\varphi_{rec})^0 - (\varphi^{sat})^0 \right] + \delta w_{rec}^{sat} + \delta N_{rec}^{sat} + \varepsilon_{rec}^{sat}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где Φ_{rec}^{sat} – измеренная фазовая псевдодальность;

δ_{rec} , δ^{sat} – запаздывание в аппаратуре приемника и спутника;

N_{rec}^{sat} – начальная целочисленная фазовая неоднозначность;

δm^{sat} – влияние многолучевости на спутнике;

δm_{rec} – влияние многолучевости в окружении приемника;

$\left[(\varphi_{rec})^0 - (\varphi^{sat})^0 \right]$ – разность начальных фаз генераторов приемника и спутника;

δw_{rec}^{sat} – влияние набега фазы, из-за изменения взаимной ориентировки антенн спутника и приемника;

δN_{rec}^{sat} – потери счета циклов;

ε_{rec}^{sat} – шум измерений фазовой псевдодальности.

Некоторые компоненты уравнений (1.2) и (1.5) очень трудно и даже невозможно моделировать. Поэтому для эффективной обработки ГНСС наблюдений разработаны методики, основанные на использовании различных видов разностей и комбинаций результатов измерений, в которых исключаются те или иные компоненты уравнений наблюдений (1.2) и (1.5).

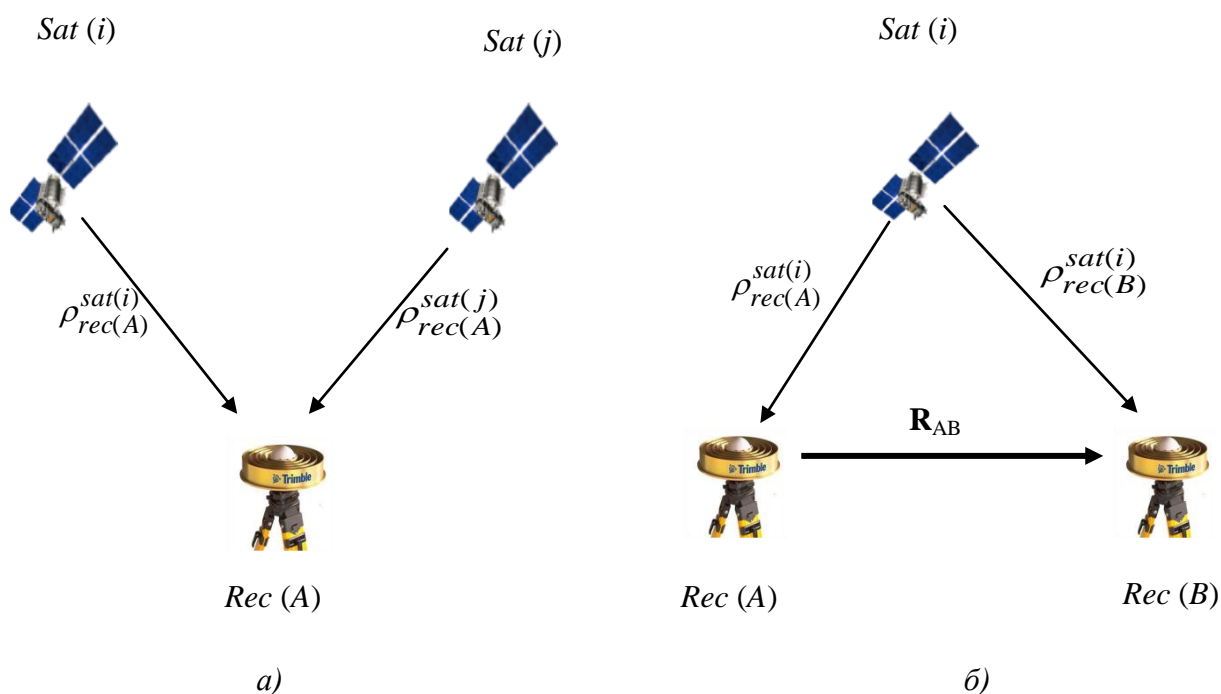
Для обоснования разработанной в диссертации методики контроля фазовых ГНСС измерений в 1.4 – 1.8 будут рассмотрены математические модели различных компонент, входящих в уравнения (1.2) и (1.5). Кроме того, для

каждого компонента уравнений (1.2) и (1.5) будет дана оценка его величины и скорости изменения.

1.2 Разности фазовых ГНСС псевдодальностей

В спутниковых технологиях при обработке данных широко используются не сами измеренные величины, а их комбинации – трансформанты, к которым относят одинарные, двойные и тройные разности, и различные виды комбинаций. Эти трансформанты обладают новыми свойствами и широко используются при обработке ГНСС наблюдений.

Разности, которые могут быть образованы между фазовыми измерениями одного и того же сигнала (частоты) двумя приемниками от одного спутника, или одним приемником от двух спутников, по определению В. Remondi называются одинарными разностями [121]. На рисунке 1.1 представлена геометрическая интерпретация образования одинарных разностей.



а) между спутниками; б) между станциями

Рисунок 1.1 – Одинарные разности

При формировании одинарных разностей между спутниками исключаются погрешности часов приемника, уменьшается влияние тропосферы и ионосферы, при этом шум измерений растет. Для одинарных разностей, образованных между станциями, исключается погрешность часов спутника [15, 30, 32, 41, 121].

Разности, сформированные между двумя приемниками и двумя спутниками, называются двойными разностями [121]. На рисунке 1.2 представлена геометрическая интерпретация образования двойных разностей.

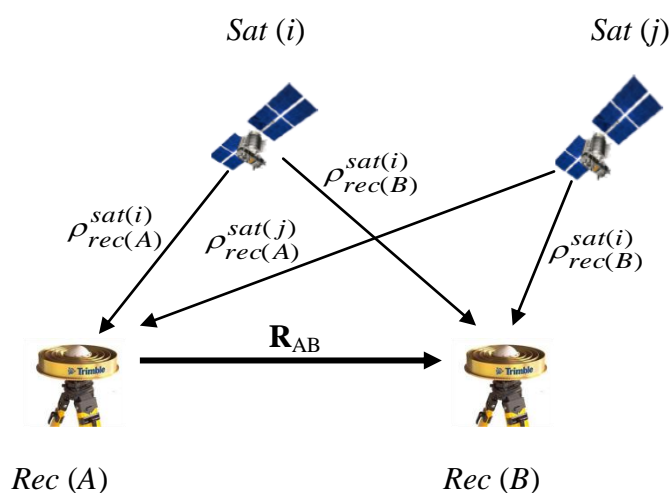


Рисунок 1.2 – Двойные разности

При формировании двойных разностей практически полностью исключаются погрешности, связанные с часами приемника и спутника, уменьшается влияние тропосферы и ионосферы, но при этом шум измерений растет [41, 121].

Во многих научных программах, таких как Bernese [67, 68], GIPSY, GAMIT [85], а также в коммерческих программах обработки данных сетей активных базовых станции, таких как, Leica GNSS Spider (Leica Geosystem), Trimble GPSNet (Trimble), TopNet RTK (Topcon), GNSMART (Geo++), двойные разности являются основной величиной, из которой в результате обработки определяются пространственные координаты [25, 143].

Тройная разность образуется из двойных разностей в результате вычитания между эпохами. В ней исключается влияние атмосферы (ионосферы и тропосферы), а фазовая многолучевость принимает минимальное значение. Стоит отметить, что сформированная тройная разность обладает присущими только ей достоинствами. Основное, и главное, состоит в том, что в полученных измерениях полностью отсутствуют начальные неоднозначности фаз, поэтому изменения в неоднозначностях не влияют на математическую модель измеренных псевдодальностей [41]. Кроме того, тройные разности являются идеальным инструментом для выявления аномальных значений в фазовых измерениях, но при этом данный способ все же ограничен повышенным уровнем шума [22, 121].

Кроме одинарных, двойных и тройных разностей в ГНСС технологиях также активно используются первые разности, которые могут быть получены путем вычитания фазовых псевдодальностей между двумя смежными эпохами наблюдений. Уравнения приращений фаз $\Delta\phi_{rec}^{sat}$ для частотного диапазона L1 (или L2) за интервал времени Δt имеют вид [129]

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{rec}^{sat} (L1)_{i,i+1} = & (\phi_{rec}^{sat})_{i+1} - (\phi_{rec}^{sat})_i = \frac{1}{\lambda_{L1}} \cdot [(\Delta\rho_{rec}^{sat})_{i,i+1} - (\Delta I_{rec}^{sat})_{i,i+1} + \\ & + (\Delta T_{rec}^{sat})_{i,i+1} + (\Delta\delta m_{rec}^{sat})_{i,i+1} + ((A1_{rec})_{i,i+1} - (A1^{sat})_{i,i+1}) \cdot \Delta t + \\ & + (\delta N_{rec}^{sat})_{i,i+1} + (v_{rec}^{sat})_{i,i+1}], \end{aligned} \quad (1.6)$$

где $(\Delta\rho_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – изменения в геометрической дальности;

$(\Delta I_{rec}^{sat})_{i,i+1}$, $(\Delta T_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – изменения в ионосферной и тропосферной задержке,

выраженные в линейной мере;

$(\Delta\delta m_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – изменение влияния многолучевости на фазовые измерения;

$(A1_{rec})_{i,i+1}$, $(A1^{sat})_{i,i+1}$ – дрейф частоты, соответственно, для приемника и спутника;

$(\delta N_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – потери счета циклов;

$(v_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – шумовая составляющая стохастического характера;

λ_{L1} – длина волны частотного диапазона L1.

Уравнение (1.6) является основным уравнением методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, которая будет рассмотрена во втором разделе диссертации.

1.3 Линейные комбинации фазовых ГНСС псевдодальностей

Линейная комбинация (ЛК) вида

$$(\Phi_{rec}^{sat})_{iono-free} = \frac{f_{L1}}{f_{L1} - f_{L2}} \cdot \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1} - f_{L2}} \cdot \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L2} \quad (1.7)$$

называется *ионосферно-свободной ЛК*.

В формуле (1.7) $\Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1}, \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L2}$ – это фазовые наблюдения в линейной мере в момент t со спутника sat в приемнике rec в диапазонах частот L1 и L2, а f_{L1}, f_{L2} – частота радиосигнала в диапазонах частот L1 и L2.

Достоинством ионосферно-свободной ЛК является то, что она позволяет практически полностью исключить влияние ионосферы. Остаточное же влияние ионосферы оценивается величиной до 3 см [28, 84]. Кроме того, ионо-свободная ЛК широко применяется в методике разрешения неоднозначностей между опорными станциями [132]. Главным недостатком данной ЛК является то, что целочисленная неоднозначность, содержащаяся в фазовых псевдодальностях на диапазонах частот L1 и L2, становится вещественным параметром и требует дополнительных усилий для разрешения «псевдоцелочисленной» неоднозначности.

Линейная комбинация вида

$$\Phi_{geom-free} = N_{rec}^{sat}(t)_{L1} \cdot \lambda_{L1} - N_{rec}^{sat}(t)_{L2} \cdot \lambda_{L2} - I_{rec}^{sat}(t)_{L1} + I_{rec}^{sat}(t)_{L2} \quad (1.8)$$

называется *ЛК свободной от геометрии*.

В формуле (1.8) $N_{rec}^{sat}(t)_{L1}$, $N_{rec}^{sat}(t)_{L2}$ – это начальные целочисленные фазовые неоднозначности в момент t со спутника sat в приемнике rec в диапазонах частот L1 и L2, а λ_{L1} , λ_{L2} – длина волны в диапазонах частот L1 и L2.

Основное достоинство данной комбинации в том, что она не зависит от погрешности часов спутника и приемника. Недостатком же является то, что в ней присутствует целочисленная неоднозначность и малая по величине ионосферная погрешность.

Широкополосная ЛК образуется в результате вычитания фазовых уравнений на диапазонах частот L1 и L2. Длина волны ЛК составляет около 86 см, что определяет ее название.

$$(\varphi_{rec}^{sat})_{WL} = \varphi_{rec}^{sat}(t)_{L1} - \varphi_{rec}^{sat}(t)_{L2}, \quad (1.9)$$

где $(\varphi_{rec}^{sat})_{WL}$ – широкополосная линейная комбинация;

$\varphi_{rec}^{sat}(t)_{L1}$, $\varphi_{rec}^{sat}(t)_{L2}$ – фазовые наблюдения (в циклах) в момент t со спутника sat в приемнике rec в диапазонах L1 и L2, соответственно (в циклах).

Основным недостатком данной ЛК является повышенный шум измерений.

Широкополосная ЛК используется во многих научных программах с целью фиксирования потерь счета циклов и разрешения фазовых неоднозначностей [143].

Узкополосная ЛК образуется в результате сложения фазовых уравнений на диапазонах частот L1 и L2. Длина волны такой ЛК мала и составляет около 10 см.

$$(\varphi_{rec}^{sat})_{NL} = \varphi_{rec}^{sat}(t)_{L1} + \varphi_{rec}^{sat}(t)_{L2}, \quad (1.10)$$

где $(\varphi_{rec}^{sat})_{NL}$ – узкополосная линейная комбинация;

$(\varphi_{rec}^{sat})(t)_{L1}, (\varphi_{rec}^{sat})(t)_{L2}$ – фазовые наблюдения (в циклах) в момент t со спутника sat в приемнике rec в диапазонах L1 и L2, соответственно (в циклах).

Узкополосная ЛК совместно с другими видами линейных комбинаций широко используется для выявления потерь счета циклов в фазовых ГНСС измерениях [1]. Недостатком узкополосной ЛК является то, что из-за очень малой длины волны и повышенного уровня шума процедура разрешения фазовой неоднозначности затруднена [143].

В таблице 1.1 [1, 67] приведены основные характеристики фазовых ЛК.

Таблица 1.1 – Характеристики фазовых линейных комбинаций

Обозначение	Наименование	Длина волны, см	Коэффициент усиления шума	Коэффициент усиления ионосферной задержки
$(\Phi_{rec}^{sat})_{iono-free}$	Ионосферно-свободная комбинация	0,6	3,2	0,0
$(\Phi_{rec}^{sat})_{geom-free}$	Комбинация свободная от геометрии	∞	1,4	-0,65
$(\varphi_{rec}^{sat})_{WL}$	Широкополосная линейная комбинация	86	6,4	-1,28
$(\varphi_{rec}^{sat})_{NL}$	Узкополосная линейная комбинация	10	0,8	1,28

1.4 Источники погрешностей фазовых ГНСС измерений

В зависимости от происхождения можно выделить следующие источники погрешностей, возникающих в фазовых ГНСС измерениях [28]:

– погрешности, относящиеся к спутнику (погрешность, обусловленная нестабильностью хода часов на спутнике, запаздывание сигнала между его генерацией и передачей из антенны спутника, погрешности эфемеридного обеспечения, погрешность положения фазового центра передающей антенны спутника);

– погрешности, относящиеся к приемнику (погрешность положения фазового центра антенны приемника, погрешность, обусловленная

нестабильностью хода часов в приемнике, запаздывание сигналов в приемнике, релятивистские эффекты в часах приемника, шумы приемника);

– погрешности, вызванные средой распространения сигнала (тропосферная и ионосферная задержка, многолучевость);

– погрешности математической модели (некорректное разрешение неоднозначности фазы несущей, набег фазы, вызванный изменением во взаимной ориентировке антенн спутника и приемника, погрешность в координатах наблюдателя);

– не моделируемые погрешности (помехи, вызываемые линиями электропередач (ЛЭП), дизельными двигателями, неисправными приемопередатчиками, станциями мобильной связи и другими источниками электромагнитных полей; выбросы в фазовых ГНСС измерениях, обусловленные ионосферными возмущениями, различными видами интерференции).

1.5 Погрешности измерений, связанные со спутником

Погрешности эфемеридного обеспечения. Различают априорные (бортовые) и апостериорные эфемериды. Первые из них представляют собой прогноз, вторые – результат обработки измерений. По степени оперативности бывают бортовые, ультрабыстрые, быстрые и финальные эфемериды.

В таблице 1.2 приводятся наиболее вероятные погрешности эфемерид спутников GPS, взятые с сайта Международной ГНСС службы (IGS) [94].

Таблица 1.2 – Погрешности и время задержки продуктов IGS

Эфемериды спутников GPS	Погрешность, см	Время задержки
Бортовые	≈ 100	Реальное время
Ультрабыстрые	≈ 5	3 – 9 ч
Быстрые	$\approx 2,5$	17 – 41 ч
Финальные	$\approx 2,5$	12 – 18 дн

Моделирование эфемерид ИСЗ – сложная задача, так как реальное движение спутников систем ГЛОНАСС и GPS существенно отличается от

невозмущенного Кеплерова движения. На космические аппараты действует целый ряд возмущающих сил, среди них притяжение, обусловленное нецентральной частью геопотенциала, притяжение Луны и Солнца, световое давление, атмосферное торможение и другие силы [12, 33, 42].

Для возмущающих факторов, обусловленных влиянием Луны и Солнца, а также нецентральной частью геопотенциала (особенно второй зональной гармоники), существуют довольно точные математические модели. В то же время для возмущающих сил негравитационного происхождения (световое давление, атмосферное торможение) сложно подобрать адекватные математические модели с нужной точностью, поэтому для них используют приближенные оценочные формулы.

В таблице 1.3, взятой из работ [16, 17], приводятся величины влияния возмущающих сил на положения спутников типа ГЛОНАСС и GPS на орбите.

Таблица 1.3 – Величины влияния возмущающих сил на положения спутников типа ГЛОНАСС и GPS на орбите

Возмущающий фактор	Максимальное возмущающее ускорение, м/с ²	Максимальное возмущение за 1 ч, м
Центральное поле Земли	0,565	–
Вторая зональная гармоника (C ₂₀)	$5,3 \cdot 10^{-5}$	300
Притяжение Луны	$5,5 \cdot 10^{-6}$	40
Притяжение Солнца	$3 \cdot 10^{-6}$	20
Четвертая зональная гармоника (C ₄₀)	10^{-7}	0,6
Световое давление	10^{-7}	0,6
Гравитационные аномалии	10^{-8}	0,06
Другие факторы	10^{-8}	0,06

На основании таблицы 1.3 можно сделать следующий вывод: на коротких дугах орбит (не более 30 с) влиянием возмущающих факторов можно пренебречь, и, следовательно, траекторию движения спутника ГНСС на этих интервалах можно считать невозмущенной.

Погрешность, обусловленная нестабильностью хода часов на спутнике.

Роль часов в точном определении координат с помощью спутниковых приемников очень велика. Как показано в уравнении (1.2), поправки часов спутника и приемника умножаются на скорость света, поэтому даже малая погрешность определения сдвига шкалы часов будет оказывать значимую погрешность в измерения фазовой псевдодальности. Например, погрешность определения сдвига шкалы часов приемника на величину 10^{-6} с приведет к погрешности в измерение псевдодальности в 300 м.

Поэтому для поддержания системного времени каждый спутник оснащается как минимум четырьмя высокостабильными атомными (цезиевыми или рубидиевыми) опорными генераторами частоты. В таблице 1.4, взятой из работ [16-17], приведены некоторые количественные характеристики высокостабильных генераторов частоты.

Таблица 1.4 – Некоторые количественные характеристики высокостабильных опорных генераторов частоты

Характеристика	Тип генератора		
	Рубидиевый	Цезиевый	Водородный
Относительная нестабильность частоты за 1 с	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-13}$
Относительная нестабильность частоты за 1 мин	$2 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-14}$
Относительная нестабильность частоты за 1 ч	$1 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-14}$
Относительная нестабильность частоты за 1 сут	$5 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-14}$
Систематический дрейф	$3 \cdot 10^{-11}$ (за месяц)	$3 \cdot 10^{-12}$ (за год)	не обнаружен

На основании таблицы 1.4 можно сделать следующий вывод: среднеквадратические отклонения (СКО) сдвига бортовой шкалы времени составляют примерно 7 нс через 2 ч для рубидиевых генераторов частоты, через 24 ч эта величина будет равна уже 108 нс.

Поэтому для синхронизации часов спутников Контрольно-корректирующими службами выполняется привязка бортовой шкалы времени к

системному времени, поддерживаемому группой атомных и водородных стандартов частоты центрального синхронизатора времени.

Синхронизация часов заключается в расчете частотно-временных поправок, представляющих собой полиномиальную модель линейного типа для спутников системы ГЛОНАСС, и полиномиальную модель второй степени для спутников системы GPS. Погрешность взаимной синхронизации (привязки) часов спутников системы GPS составляет 10 нс (СКО) [96]. Погрешности взаимной синхронизации (привязки) часов спутников ГЛОНАСС составляют 20 нс (СКО), для ГЛОНАСС-М – 8 нс (СКО) [20, 43].

1.6 Погрешности аппаратуры пользователя

Неточное знание фазового центра антенны ГНСС приемника. Фазовый центр – это «фокус» антенны, в котором совпадают одинаковые фазовые фронты пришедших радиосигналов. Фазовый центр антенны не является постоянной точкой поэтому для каждого спутника ГНСС и для каждого несущего сигнала (L1, L2, L5) свой электрический центр. При выполнении спутниковых наблюдений высоту антенны измеряют до одной из характерных точек (ARP – antenna reference point). В качестве таковых выступают дно антенны (bottom of antenna mount) или верх выреза антенны (top of notch).

Неточное знание фазового центра антенны дает дополнительную погрешность, преимущественно, в измерение высоты. Величина смещения фазового центра от точки ARP может достигать порядка 10 см [114, 115], в некоторых антеннах эта величина доходит до 25 см. Смещения в плане обычно не превышают 1 см. Изменение их положения происходит достаточно медленно в соответствии с изменением положения спутника, то есть 1-2 мм за час.

Поэтому все антенны проходят калибровку на специальных установках, в ходе которой определяются поправки для каждого несущего сигнала в зависимости от азимута и высоты спутника.

Существует два вида калибровки ГНСС антенн: абсолютный и относительный [117]. Абсолютный способ основан на выводе поправок по известным измеренным радиосточникам, в относительном же способе используется качественная измеренная базовая линия, на концах которой устанавливаются тестируемые антенны, при чем одна из них принимается за эталонную. Тогда поправки определяются из разностей наблюдений.

Для каждого типа антенн составляются таблицы поправок (Phase Center Table, PCT), которые выкладываются на сайте Национальной геодезической службы США [119] и на сайте компании GEO++ (Германия) [138]. Эти файлы подключаются к базам данных программ обработки.

Погрешность, обусловленная нестабильностью хода часов в приемнике. Спутниковые ГНСС приемники оснащены кварцевыми генераторами, которые имеют кратковременную стабильность частоты порядка (10^{-6}) [1, 18, 122, 139, 140]. Основные достоинства этих часов – компактность, малое энергопотребление и низкая стоимость. В некоторых современных приемниках фирм Leica, Trimble устанавливается термостатированный кварц, со стабильностью хранения времени, приблизительно 10^{-8} [112].

В таблице 1.5, взятой из работы [48], приведены некоторые количественные характеристики кварцевых генераторов частоты.

Таблица 1.5 – Некоторые количественные характеристики кварцевых генераторов частоты, взятые из работы [48]

Характеристика	Тип генератора		
	ТСХО	МСХО	ОСХО
Относительная нестабильность частоты за год	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Старение за год	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$

В последние годы на рынке микроэлектроники все активнее стали появляться миниатюрные атомные стандарты частоты [62, 77, 101, 126]. На рисунке 1.3 изображены миниатюрные атомные часы американской фирмы Symmetricom [77]. Планируется начать выпуск подобных часов в России.



Рисунок 1.3 – Миниатюрные атомные часы американской фирмы Symmetricom [77]

Отличительной особенностью малогабаритных атомных часов является относительная нестабильность хранения времени порядка 10^{-11} . В таблице 1.6 приведены характеристики относительной нестабильности малогабаритных стандартов частоты фирмы Symmetricom серии SA.45s [120].

Таблица 1.6 – Характеристики относительной нестабильности малогабаритных стандартов частоты фирмы Symmetricom серии SA.45s [120]

Характеристика	Серия SA.45s	
	Опция 001	Опция 002
Относительная нестабильность частоты за 1 с	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$
Относительная нестабильность частоты за 10 с	$5 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-11}$
Относительная нестабильность частоты за 1000 с	$5 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-12}$

В абсолютном методе позиционирования ошибка часов приемника входит как неизвестный параметр в навигационное решение, и оценивается совместно с положением приемника [111, 112].

Шум приемника. Под шумом приемника понимается погрешность, возникающая при сравнении принятого сигнала, транслируемого спутником, и его копии, созданной в приемнике. Выравнивание принятого и созданного в приемнике кодов в общем случае возможно примерно с погрешностью 1–2 % от тактовой скорости [122]. Для грубого кода (C/A) – шум составляет 3 м, для P -

кодовых – 30 см, для фазовых псевдодальностей GPS – 2 мм. Для кода стандартной точности (СТ) шум составляет 6 м, для кода высокой точности (ВТ) – 60 см, для фазовых псевдодальностей ГЛОНАСС – 2 мм. Отметим, что некоторые авторы к шуму измерений относят сумму всех не моделируемых ошибок, а также члены второго порядка в моделях измерений [143].

1.7 Погрешности, вызываемые средой распространения сигнала

Ионосферная задержка. Ионосфера – это слой атмосферы, простирающийся примерно от 50 км до 1000 км, и в основном состоящий из четырех частей (D, E, F1 и F2) [28].

Ионосфера является диспергирующей средой. Величина ИЗ зависит от частоты, кроме того, ее влияние на кодовые и фазовые псевдодальности происходит с противоположными знаками. Возникают так называемые два явления: фазовое опережение и групповая задержка [111, 112].

Величина запаздывания сигнала в ионосфере зависит от 11-летнего солнечного цикла активности, сезонных и суточных вариаций электронной концентрации, а также от широты места наблюдения [29]. Максимальная величина ИЗ в зенитном направлении может достигать до 30 м, вблизи горизонта – до 100 м [111, 112]. При спокойной ионосфере ИЗ изменяется достаточно медленно, скорость изменения величины ИЗ составляет обычно несколько миллиметров за секунду. Однако при магнитных бурях в ИЗ возможны резкие скачки, вызывающие аномальные погрешности в измерениях фазы несущей.

Для частоты f величина ИЗ (в линейной мере) равна

$$I_{rec}^{sat} = \frac{40,3 \cdot TEC \cdot Q(h)}{f^2}, \quad (1.11)$$

где TEC – полное содержание электронов,

$Q(h)$ – ионосферная функция отображения (фактор наклона), зависящая от угла высоты спутника h .

Тропосферная задержка. Тропосфера – это нижняя часть атмосферы, которая простирается до 8–10 км на полюсах, и до 16–18 км на экваторе [40]. В отличие от ионосферы, тропосфера для радиоволн является недиспергирующей средой, то есть ее влияние не зависит от частоты, поэтому величина ТЗ имеет одинаковый знак и для фазовых, и для кодовых псевдодальностей [33].

Обычно тропосферная задержка представляется через гидростатическую и влажную зенитную задержку ($T_{z,h}$), ($T_{z,w}$) и гидростатическую и влажную функции отображения m_h , m_w , зависящие от высоты спутника h

$$T_{rec}^{sat} = (T_{z,h}) \cdot m_h + (T_{z,w}) \cdot m_w. \quad (1.12)$$

$$m_h \approx m_w \approx \frac{1}{\sinh}. \quad (1.13)$$

Тропосферная задержка оказывает существенное влияние на точность относительного и дифференциального метода из-за различного распределения паров воды в атмосфере [66, 93, 102].

Существует несколько десятков моделей учета тропосферы. В коммерческих программных продуктах обычно используется модель тропосферы Н. Норфилд [122].

Величина ТЗ в зените составляет 2 м, вблизи горизонта (при угле 10°) – порядка 20 м. Тропосферная задержка изменяется медленно в соответствии с движением спутника по высоте над горизонтом и изменениями в погодных условиях, ее скорость имеет 1–2 мм за 1 мин [1, 4, 112].

Многолучевость – физическое явление, которое возникает в результате сложения прямого и отраженного радиосигнала в антенне спутникового приемника. Многолучевость является одной из самых сложных погрешностей,

которые необходимо учитывать в ГНСС технологиях [112]. Любой объект возле антенны приемника является источником многолучевости. Это, прежде всего, здания, особенно крыши, деревья, рекламные щиты, водная гладь, асфальтовое покрытие и другие.

Величина влияния многолучевости на фазовые измерения для частоты $L1$ оценивается в 5 см, для частоты $L2$ – 6 см [76, 111, 112, 132].

Многолучевость зависит от многих параметров, поэтому описать математически строго данную погрешность не представляется возможным, часть из них меняется постоянно и зависит, прежде всего, от геометрии спутник-приемник. В работах [117, 127] показано, что многолучевость у спутников GPS повторяется через два витка (каждые звездные сутки на 4 мин раньше), у спутников ГЛОНАСС – каждые 17 витков [21].

Для исследования разностной (дифференциальной) кодовой многолучевости может быть применена следующая комбинация кодовых и фазовых псевдодальностей [47]

$$\begin{aligned} \Delta MP_{code} = & \left[P_{rec}^{sat}(t)_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot (P_{rec}^{sat}(t)_{L2} - P_{rec}^{sat}(t)_{L1}) \right] - \\ & - \left[\Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot (\Phi_{rec}^{sat}(t)_{L2} - \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1}) \right]. \end{aligned} \quad (1.14)$$

В формуле (1.14) ΔMP_{code} – дифференциальная кодовая многолучевость, $\Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1}, \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L2}$ – фазовые измерения в момент t со спутника sat в приемнике rec в диапазонах частот $L1$ и $L2$, соответственно (в линейной мере), $P_{rec}^{sat}(t)_{L1}, P_{rec}^{sat}(t)_{L2}$ – P-кодовые измерения в момент t со спутника sat в приемнике rec в диапазонах частот $L1$ и $L2$ (в линейной мере), f_{L1}, f_{L2} – частота радиосигнала в диапазонах $L1$ и $L2$.

Достоинства линейной комбинации в том, что она позволяет оценивать дифференциальную кодовую многолучевость за счет разной чувствительности кодовых и фазовых псевдодальностей [47].

1.8 Погрешности в математической модели ГНСС измерений

Разрешение неоднозначности фазы несущей. Для достижения сантиметрового уровня определения координат в спутниковых ГНСС технологиях используются данные измерений фазы несущей. Основной проблемой, возникающей при вычислении расстояния от спутника до приемника по этим данным, является их нецелочисленная физическая природа. Фаза несущей состоит из двух основных составляющих: целочисленной и дробной части. Поэтому в процессе обработки измерений возникает необходимость в корректном определении целого числа длин волн, которые укладываются в расстояние между передающей антенной спутника и принимающей антенной приемника [24]. Подобный процесс определения целого числа длин волн получил название в технической литературе, как разрешение целочисленной неоднозначности фазы несущей [99].

На сегодняшний момент разработано порядка двух десятков методов разрешения целочисленных неоднозначностей, которые можно условно разделить на три группы: поиск и разрешение в пространстве неоднозначностей, поиск и разрешение в пространстве наиболее достоверных координат, поиск и разрешение в пространстве измерений [108].

Набег фазы. Набег фазы – это явление, вызванное изменением во взаимной ориентировке антенн спутника и приемника [109]. По оценкам, проведенных в работе [136], данная погрешность в относительном методе может составлять до 4 см на базовых линиях длиной до 4000 км. В относительном методе влияние набег фазы изменяется очень медленно и почти полностью исключается в двойных разностях фаз [2, 100, 104, 109, 136].

Выбросы и «пачки выбросов» в фазовых ГНСС псевдодальностях. Под выбросами в ГНСС наблюдениях будем понимать отсчеты, погрешности которых в несколько раз превышают уровень шума и существенно снижают точность фазовых псевдодальностей. Под «пачками выбросов» будем понимать наблюдаемая на некотором временном интервале совокупность выбросов. К выбросам относят [61]:

а) скачки в счете циклов, вызванные потерей захвата фазы приемником [92, 111, 129]. Выделяют три типа потери счета циклов в фазовых наблюдениях [61]: целочисленные, полуцелочисленные и дробноцелочисленные.

Целочисленные потери счета представляет собой случай, когда мгновенно происходит изменение на целое число длин волн N в отслеживаемой фазе (рисунок 1.4);

б) потери захвата спутникового сигнала, которые происходят, когда приемник теряет возможность отслеживать транслируемый сигнал. Это приводит к тому, что целочисленный счетчик в приемнике смещает свое показание на какую-то величину Δ , которая является вещественным числом. На рисунке 1.5 приведена геометрическая интерпретация потери захвата спутникового сигнала;

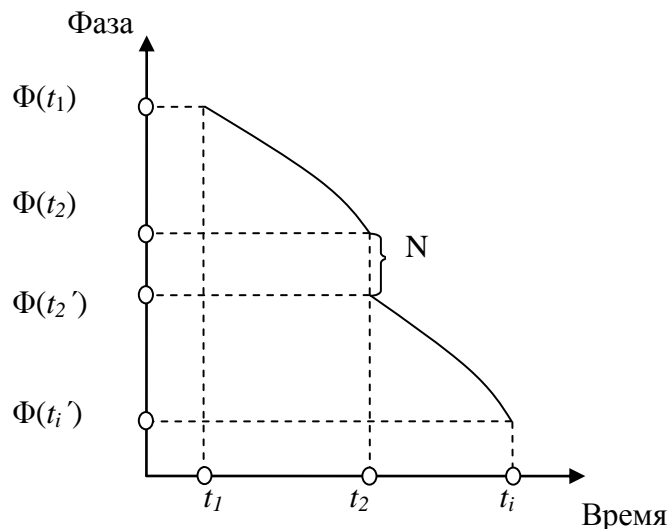


Рисунок 1.4 – Целочисленная потеря счета циклов

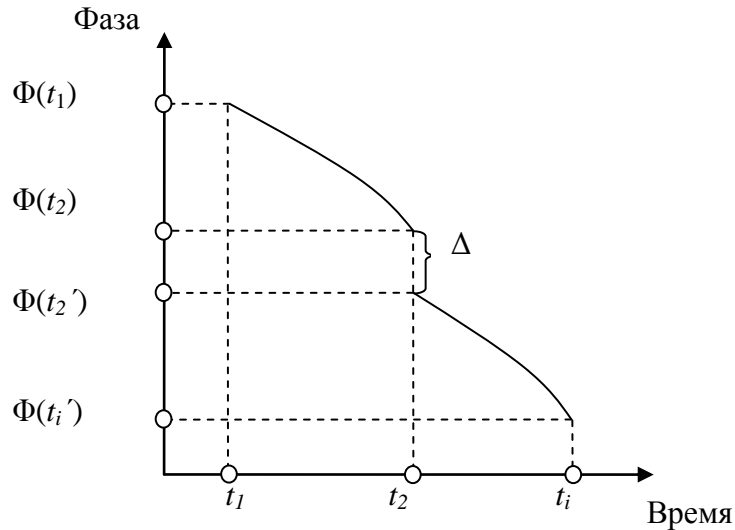


Рисунок 1.5 – Потери захвата спутникового сигнала

в) разрывы в измеренных данных, которые являются пропусками в наборе данных. Разрывы происходят, в основном, из-за неполадок в приемнике. Особенно много разрывов в измеренных данных происходит в кинематических наблюдениях [37, 129];

г) искажения в измеренных данных, которые возникают, когда измеренное значение является ошибочным в отдельно взятую эпоху. Причинами появления искажения могут быть сбои в приемнике или потери связи между приемником и оборудованием, записывающим эти данные. На рисунке 1.6 приведена геометрическая интерпретация искажений в измеренных данных.

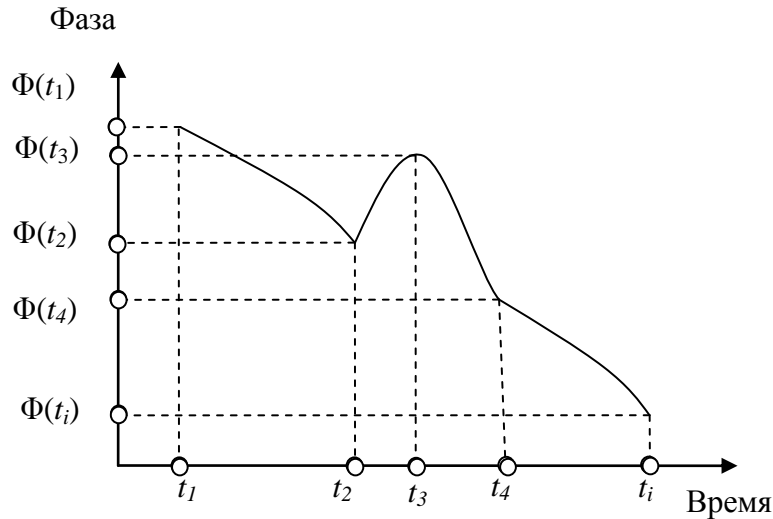


Рисунок 1.6 – Искажения в измеренных данных

Выделяют четыре причины возникновения выбросов в фазовых ГНСС измерениях [129]. Первая – это блокировка сигналов различными препятствиями, прежде всего деревьями, зданиями, рекламными щитами, различными строительными объектами. Следующая причина, малая величина отношения «сигнал-шум», вызванная ионосферными влияниями (ионосферными сцинтилляциями) на радионавигационный сигнал, многолучевостью, низкой высотой спутника над горизонтом [107]. Третьей и четвертой причинами являются неполадки в самом приемнике, и высокая динамика спутниковой ГНСС антенны (при выполнении кинематических измерений) [92, 111, 129].

1.9 Величина и скорость изменения атмосферных влияний и многолучевости

В работе [5] был выполнен расчет возможных изменений в ионосферной и тропосферной задержках, а также в многолучевости при условиях, близких к наиболее неблагоприятным. Эти изменения можно рассматривать как компоненты первых разностей фазовых псевдодальностей или как дифференциальные атмосферные влияния при обосновании необходимости их учета в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и

координатам пункта наблюдений. Результаты расчетов приведены в таблице 1.7. При расчетах было принято: высота спутника над горизонтом $h = 15^\circ$, полная зенитная тропосферная задержка равна 2,5 м, вертикальная ионосферная задержка 10 м, угловая скорость движения спутника по углу высоты $n = 0,5'/с$, многолучевость для фазы 10 см за 5 мин.

Таблица 1.7 – Величина дифференциальных атмосферных влияний и многолучевости

Дифференциальное влияние, с	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 10$	$\Delta t = 30$	$\Delta t = 60$	$\Delta t = 600$
Тропосферная задержка, мм	1,3	13	40	80	800
Ионосферная задержка, мм	5,2	52	160	320	3200
Многолучевость для фазы, мм	1	7	20	40	200
Суммарное влияние, мм	7,5	72	220	440	4200

Из таблицы 1.7 видно, что изменения в тропосферной и ионосферной задержках, а также многолучевости в сумме составляют по величине практически один цикл при интервале наблюдений 30 с. Поэтому для корректного обнаружения потерь счета циклов с использованием методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений необходимо учитывать дифференциальные влияния тропосферной и ионосферной задержек. Влиянием многолучевости из-за сложности ее учета пренебрегаем.

1.10 Методы ослабления влияний источников погрешностей

Методы ослабления влияний различных источников погрешностей можно разделить на две принципиально разные группы: применение математических моделей, которые выводятся на основании эмпирической зависимости одной величины от другой, или образование линейных комбинаций между основными видами ГНСС наблюдений с целью исключения или уменьшения величины влияния. В случае если какую либо составляющую некоторой компенсирующей

модели трудно или невозможно учесть, то тогда такая составляющая входит в ряд оцениваемых параметров, тем самым, расширяя вектор состояния системы.

В таблице 1.8 приведены основные источники погрешностей и способы их ослабления [139].

На основании таблицы 1.8 можно сделать следующие выводы. Большинство источников погрешностей, возникающих в фазовых ГНСС измерениях, могут быть исключены за счет применения различных линейных комбинаций, образованных кодовыми и фазовыми псевдодальностями, или существенно уменьшены путем использования различных математических моделей. Так, например, для разрешения целочисленной неоднозначности предложено порядка двух десятков методов (LAMBDA, FARA, FASF и пр.) [111], а для учета влияния тропосферы порядка тридцати моделей и методик.

Однако проблема потерь счета циклов, которая заключается в корректном выявлении и восстановлении отсчетов непрерывной фазы несущей, все еще остается нерешенной, что приводит к снижению точности и увеличению продолжительности наблюдений.

1.11 Обзор методов контроля фазовых ГНСС измерений

Классификация методов контроля фазовых ГНСС измерений. Методы контроля потерь счета циклов в фазовых псевдодальностях условно можно разделить на три группы [78]. К первой группе относятся методы, которые позволяют уменьшать вероятность появления потерь счета циклов путем совершенствования аппаратурных частей спутникового приемника. Это происходит, в основном, за счет постоянной модернизации принимающих геодезических антенн, разработки совершенных корреляторов, перехода на цифровую обработку сигналов [129]. Вторая группа методов использует данные, которые получены в результате наблюдений. К ним относятся различные комбинации кодовых и фазовых псевдодальностей, а также доплеровских сдвигов частоты [34].

Таблица 1.8 – Основные источники погрешностей, возникающих в фазовых ГНСС измерениях, и способы их ослабления

Источник погрешностей	Способ ослабления погрешностей:
1	2
Погрешность часов приемника	а) использование приемников с термостатированным генератором; б) использование приемников с высокостабильным генератором частоты (малогабаритные атомные стандарты частоты, атомные, рубидиевые, цезиевые или водородные стандарты частоты); в) образование одинарных (один приемник – два спутника), двойных или тройных разностей.
Тропосферная задержка	а) использование различных глобальных моделей тропосферной задержки (Н. Hopfield, J. Saastamoinen, Н. Black, I. Ifadis, A. Niell и др.); б) определение метеопараметров (радиометры паров воды); в) определение влажной составляющей тропосферной задержки во время измерения; г) осреднение тропосферной задержки путем многократных сеансов наблюдений; д) построение локальных (региональных) моделей тропосферы с использованием сетей активных базовых станций; е) образование одинарных и двойных разностей; ж) образование геометрически свободной линейной комбинации; з) использование SINEX файлов МГС; и) включение влажной зенитной задержки в число определяемых параметров.
Ионосферная задержка	а) использование модели J. Klobuchar, заложенной в навигационном сообщении спутников GPS; б) использование точечной, плоской, суточной или другой модели; в) образование ионосферно-свободных линейных комбинаций по двум и более несущим частотам; г) построение локальных (региональных) моделей ионосферы с использованием сетей активных базовых станций; д) использование CODE IONEX файлов МГС.
Многолучевость	а) использование антенн с кольцевыми компенсаторами (антенны типа choke-ring), мультиплексные; б) установка антенн в местах с открытым радиогоризонтом; в) выбор оптимального времени наблюдения, с целью усреднения ошибки многолучевости; г) применение металлического диска (groundplane), позволяющего «отсекать» отраженные сигналы от поверхности Земли; д) использование многоантенного приемника, имеющего две, три или более антенн;

Продолжение таблицы 1.8

1	2
Многолучевость	е) использование элементов приведения (антенну устанавливают не на самом пункте, а на пункте с открытым радиогоризонтом и вычисляют элементы приведения); ж) не наблюдать спутники с малой отсечкой по высоте.
Шумы приемника	а) цифровая обработка сигналов; б) использование узких и стробовых корреляторов.
Набег фазы	а) образование двойных и тройных разностей; б) использование модели учета набега фазы.
Разрешение целочисленной неоднозначности	а) использование методов LAMBDA, LFAST, FARA, FASF, OMEGA и др.; б) образование тройных разностей.

Методы третьей группы вычисляют поправки в измерения и линейные комбинации измерений на основе внешней информации от различных инерциальных навигационных систем (акселерометры, одометры, гироскопы и другие). На основе этой коррекции появляется возможность поиска потерь счета циклов.

Методы уменьшения вероятности появления потерь счета циклов в фазовых наблюдениях. Вероятность появления потерь счета циклов в фазовых наблюдениях может быть уменьшена за счет правильного проектирования и размещения спутниковых антенн. Другой мерой является применение малошумящих усилителей, которые существенно снижают возникающие шумы в приемниках. Примерами подобных методов являются Advanced Multipath Reduction, Co-Op Tracking, J-Shield и другие [11].

Методы обнаружения потерь счета циклов в фазовых наблюдениях с использованием измерительной информации аппаратуры пользователя. В эту группу методов входит использование всевозможных линейных комбинаций кодовых и фазовых псевдодальностей, Калмановская фильтрация, применение полиномов различных степеней, вейвлет-анализ, имитационное моделирование.

Для выявления потерь счета циклов в 80-х годах XX века применялось ручное редактирование данных, которое заключалось в вычислении одинарных и двойных разностей для соответствующих результатов измерений. Метод хорошо применим при наличии точных координат пункта. Недостатки очевидны: большое количество времени на обработку наблюдений и слабый контроль при большом количестве разрывов в измерениях [1].

Метод введение новой целочисленной неоднозначности заключался в следующем: во введение целочисленной неоднозначности в результате наблюдений вследствие чего образовывался новый вектор неизвестных параметров, который требовал адекватной оценки. Достоинством метода является получение размера сдвига по фазовой частоте. Недостатки: сложность обработки

матрицы нормальных уравнений и выделение полезной информации из большого количества параметров [1].

В работах [90–92] приводится разностный метод для обнаружения потерь счета циклов. В результате многократных вычитаний отфильтровываются незначительные колебания фазовых наблюдений, позволяя при этом выявлять скачки в этих измерениях [32]. Основными недостатками метода являются невозможность учета дифференциального влияния ионосферы и многолучевости, а также то, что способ невозможно применять для кинематических наблюдений.

В. Remondi [121] в 1984 году предложил использовать для обработки алгоритм фазовых разностей. Любые большие потери счета циклов легко прослеживаются, так как они действуют локально на тройную разность. Решение ведется методом итераций до тех пор, пока полученные по МНК невязки не сходятся. Исправление потерь счета циклов повторяется до приведения неоднозначности двойных разностей к допустимому значению. Основным недостатком является повышенный уровень шума [75].

В 1985 году С. Goad [87] разработал методику, применимую для одиночного двухчастотного приемника, основанную на следующих соотношениях

$$\Phi_{rec}^{sat}(t)_{L2} = \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1} \cdot \frac{f_{L1}}{f_{L2}}. \quad (1.15)$$

Линейная комбинация d представляется как

$$d = \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1} - \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L2} \cdot \frac{f_{L1}}{f_{L2}}, \quad (1.16)$$

что затем дает

$$d = N_{rec}^{sat}(t)_{L1} - \frac{f_{L1}}{f_{L2}} \cdot N_{rec}^{sat}(t)_{L2} + \frac{I_{rec}^{sat}}{f_{L1}} \cdot \left(1 - \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2}\right), \quad (1.17)$$

где $\Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1}, \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L2}$ – фазовые наблюдения в момент t со спутника sat в приемнике rec в диапазонах L1 и L2, соответственно (в линейной мере);

f_{L1}, f_{L2} – частота радиосигнала в диапазонах L1 и L2;

$N_{rec}^{sat}(t)_{L1}, N_{rec}^{sat}(t)_{L2}$ – целочисленная неоднозначность (в линейной мере) для комбинации «спутник – приемник» rec, sat на диапазонах L1 и L2.

В 1985 году двумя немецкими геодезистами W. Melbourne и G. Wübbena была предложена широкополосная линейная комбинация кодовых и фазовых псевдодальностей [116, 137]

$$\begin{aligned} \Phi_{MW} = & \frac{f_{L1}}{f_{L1} - f_{L2}} \cdot \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1} - f_{L2}} \cdot \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L2} - \\ & - \frac{f_{L1}}{f_{L1} - f_{L2}} \cdot P_{rec}^{sat}(t)_{L1} + \frac{f_{L1}}{f_{L1} - f_{L2}} \cdot P_{rec}^{sat}(t)_{L2}, \end{aligned} \quad (1.18)$$

где Φ_{MW} – линейная комбинация Melbourne-Wübbena.

Достоинствами линейной комбинации Melbourne-Wübbena являются то, что она существенно ослабляет ионосферный эффект, а также погрешности часов приемника и спутника. Основным недостатком данной линейной комбинации – повышенный уровень шума от кодовых псевдодальностей. ЛК Melbourne-Wübbena используется во многих научных программах с целью фиксирования потерь счета циклов и разрешения фазовых неоднозначностей [68, 85].

Подобные комбинации можно составить и для P-кодовых и фазовых наблюдений в диапазонах L1/L5 и L2/L5 системы GPS, а также L1/L3 и L2/L3 системы ГЛОНАСС.

J. Blewitt в своих работах [72–73] предложил использовать модифицированную широкополосную комбинацию фазовых наблюдений для

выявления потерь счета циклов в фазовых данных. Эта модифицированная широкополосная ЛК фазовых псевдодальностей Φ_{BL} имеет вид

$$\Phi_{BL} = \frac{1}{f_{L1} - f_{L2}} \cdot (f_{L1} \cdot \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L1} - f_{L2} \cdot \Phi_{rec}^{sat}(t)_{L2}). \quad (1.19)$$

Алгоритм обнаружения потерь счета основывается на следующих рекурсивных формулах

$$\langle \Phi_{BL} \rangle_i = \langle \Phi_{BL} \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} \cdot ((\Phi_{BL})_i - \langle \Phi_{BL} \rangle_{i-1}), \quad (1.20)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} \cdot [((\Phi_{BL})_i - \langle \Phi_{BL} \rangle_{i-1})^2 - \sigma_{i-1}^2]. \quad (1.21)$$

В формулах (1.20)–(1.21) $\langle \Phi_{BL} \rangle$ – среднее значение широкополосной линейной комбинации, σ – СКО разброса значений, i – эпоха наблюдения.

Модифицированная широкополосная линейная комбинация используется в научном программном комплексе GIPSY/OASIS для выявления потерь счета циклов в фазовых ГНСС данных [72–73].

Для обработки кинематических измерений (особенно в режиме реального времени) очень часто используется метод калмановской фильтрации, основанный на сравнении полученных величин (наблюдений) и теоретических данных, построенных на основе динамической модели, которая может быть известной заранее или выведенной из результатов измерений. При этом обнаружение потерь счета происходит на основании статистических расхождений между тестируемой величиной и величиной, полученной на основе фильтра Калмана [1].

В работе D. Wang [133] используются два калмановских фильтра для двойных разностей кинематических данных. На каждой станции вычисляется

вектор положения скорости и ускорения, затем на основе этой информации прогнозируется динамическая модель движения. В результате сравнения теоретической и наблюдаемой модели определяются величины потерь счета циклов.

S. Bisnath, K. Donghyun, R. Langley в работах [70–71, 81–82] суммировали все интерполяционные методы, такие как использование разностей высоких порядков во временных сериях, полиномов низких степеней, фильтр Калмана, средневзвешенный фильтр J. Blewitt для обработки кинематических данных в режиме реального времени с целью выявления потерь счета циклов.

В работах [26, 45, 141–142] А. А. Жалило представил алгоритм обнаружения, оценки и восстановления фазовых наблюдений для сети активных базовых станций Украины. Алгоритм основан на использовании различных линейных комбинаций как для одного приемника, так и для пары приемников с последующей отбраковкой аномальных погрешностей и потерь счета циклов. При этом выбираются различного рода математические фильтры, которые и указывают на наличие потерь счета циклов в фазовых данных.

Для поиска потерь счета циклов в фазовых измерениях активно используется разложение спутниковых данных в гармонические функции с помощью вейвлет-анализа. Метод основан на выделении высоко-, средне- и низкочастотных гармоник с их последующим анализом и выделением величин, превышающих заданный порог [23, 79, 125, 134].

В работе [23] предложена методика поиска потерь счета циклов в одночастотных приемниках с использованием анализа двойных разностей на основе их разложения на высокочастотные и низкочастотные составляющие. Основными недостатками метода являются:

- необходимость иметь минимум два приемника;
- невозможность учета дифференциального влияния атмосферы (тропосферы и ионосферы);
- затрудненный выбор порогового шума для каждой составляющей.

M. de Lacy [106] использует широкополосные линейные комбинации, комбинации свободные от геометрии, а также ионосферные комбинации для поиска потерь счета циклов на основе Байесового распределения вероятности появления ошибок. Основным недостатком метода – невозможность учета дифференциального влияния ионосферы.

В работе Zh. Liu [113] представлен метод поиска потерь счета циклов в фазовых псевдодальностях для одиночного двухчастотного приемника с использованием линейной комбинации Melbourne-Wübbena и изменением ионосферной величины TEC во времени. Однако способ ограничен применением кодовых псевдодальностей, имеющих большой шум и многолучевость, кроме того, немало важным фактором является также то, что метод не применим при высокой активности ионосферы [63–65].

S. Knedlik, Zh. Dai, O. Loffeld [103] предложили метод контроля фазовых псевдодальностей для трехчастотных приемников, однако использование двухчастотных ГНСС приемников все еще преобладает для решения различных задач во многих приложениях, поскольку не все спутники GPS и ГЛОНАСС транслируют третью частоту [113].

В работах Стубарева Д. В. [49–55] представлены методы поиска потерь счета циклов на основе применения имитационного моделирования, с помощью разработанного в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии имитатора измерительной информации ModBis24 [13]. В качестве основного алгоритма поиска потерь счета циклов используется величина отклонения фазовых измерений от опорной траектории с последующим сглаживанием полиномами Чебышева, и применением адаптивного рекуррентного фильтра Калмана, а также робастных процедур и медианной фильтрации.

В работе [56] для выявления потерь счета циклов в траекторных псевдодальномерных измерениях предложили использовать нелинейные локальные алгоритмы фильтрации, а для гладкого восполнения пропущенных данных применять сглаживающие кубические сплайны.

Методы обнаружения потерь счета циклов в фазовых наблюдениях с использованием внешней измерительной информации. В этом методе для обнаружения, оценки и восстановления фазовых наблюдений используются инерциальные навигационные системы или другие виды внешней информации.

О. Colombo [74] провел эксперименты с мобильным ГНСС приемником и микро-электро-механической системой, установленными в фургоне автомобиля, на длинных базовых линиях с привлечением данных базовой станции. В результате сравнений решений, полученных с помощью спутниковой аппаратуры и измерений блока инерциальных систем, делается вывод о наличии потерь счета циклов в фазовых данных.

В работе [110] был предложен алгоритм поиска потерь счета циклов на основе положений GPS антенны и данных, полученных от инерциальных навигационных систем, с применением теста объединенной суммы для небольших изменений в средних или стандартных отклонениях измерений.

В работе [86] предложен метод поиска потерь счета циклов на основе комплексирования недорогих акселерометров и метода точного точечного позиционирования (PPP).

G. Roberts [123] использовал акселерометры, смонтированные на мостовых балках, для вычисления смещений на коротких базовых линиях. Отклонения данных акселерометров удалялись на основе того, что мост является неподвижным. Скорректированные данные акселерометра объединялись с измерениями, полученными с помощью спутниковой аппаратуры, для поиска потерь счета циклов в фазовых данных.

1.12 Постановка задач исследования

На основании проведенного в первом разделе анализа сформулируем основные задачи диссертационного исследования, которые будут рассмотрены в данной работе:

а) разработать методику контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений;

б) разработать алгоритм учета дифференциального влияния ионосферы, применяемый в методике контроля фазовых двухчастотных ГНСС измерений, полученных приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты;

в) разработать алгоритм адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа, используемый в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, на этапе фильтрации данных;

г) выполнить экспериментальную проверку методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений средствами имитационного моделирования и на основе анализа реальных ГНСС измерений;

д) разработать рекомендации по дальнейшему развитию методики контроля фазовых ГНСС измерений.

2 МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ФАЗОВЫХ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ ПО ЭФЕМЕРИДАМ СПУТНИКОВ И КООРДИНАТАМ ПУНКТА НАБЛЮДЕНИЙ

2.1 Обоснование применения первых разностей геометрических дальностей для контроля фазовых ГНСС измерений

Движение спутников ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU) происходит по орбитам, близким к круговым ($e < 0,01$), на высоте H около 20 000 км над поверхностью Земли. Погрешность положения спутника, вычисленного по навигационному сообщению, для системы GPS оценена автором в величину равную 2 м, для системы ГЛОНАСС – 4 м [20]. Согласно рабочему проекту GALILEO, погрешность определения координат спутников должна составлять 1 м [95], для системы BEIDOU – 3 м [118].

В Приложении Б приведены, выполненные автором совместно со Щербаковым А. С., исследования по оценке точности вычисления положений спутников ГЛОНАСС и GPS по бортовой эфемеридной информации [36]. Анализ основан на сравнении координат спутников, получаемых по навигационным сообщениям, с их точными апостериорными данными, представляемыми Международной ГНСС службой.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, заявленными разработчиками систем ГЛОНАСС и GPS.

При установке на пункте наблюдения ГНСС приемника для выполнения статических наблюдений происходит определение приближенных координат автономным (абсолютным) методом по кодовым псевдодальностям. Погрешность положения приемника в таком случае оценивается величиной равной 3–5 м [31]. Одновременно с измерением псевдодальностей приемник регистрирует непрерывную фазу несущей, представляющую собой разность между текущим топоцентрическим расстоянием спутника и расстоянием в момент первого измерения, выраженную в циклах. После умножения ее на длину волны получим фазовую псевдодальность в линейной мере.

Первые разности между геометрическими дальностями в эпохи t_1 и t_2 можно получить через измеренные кодовые или фазовые ГНСС псевдодальности. Эти разности расходятся из-за противоположных знаков фазовой и групповой ионосферных задержек, различаются по величине фазовой и кодовой многолучевости и уровню шума. Тем не менее, псевдодальности, измеренные по ВТ (высокой точности) коду ГЛОНАСС или по P(Y)-коду GPS используют для контроля фазовых ГНСС измерений.

Выполним оценку погрешности вычисления разностей геометрических дальностей при дискретности между эпохами наблюдений $\Delta t = t_2 - t_1$, используя приближенное положение пункта наблюдений и элементов орбиты, передаваемые в навигационном сообщении.

Для этого вводится в рассмотрение геоцентрическая система отсчета $O\xi\eta\zeta$. На рисунке 2.1 изображена геометрическая интерпретация топоцентрических разностей [3].

На рисунке 2.1 O – центр масс Земли (геоцентр), ось ξ совпадает с направлением радиуса-вектора \mathbf{R} положения под спутниковой точки A , ось η – лежит в плоскости орбиты перпендикулярно к радиус-вектору пункта, ось ζ перпендикулярна плоскости орбиты.

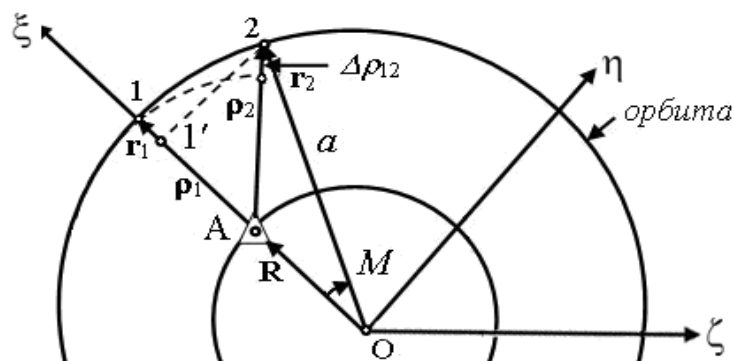


Рисунок 2.1 – Геометрическая интерпретация топоцентрических разностей

Для упрощения выводов основная плоскость $O\xi\eta$ совмещена с плоскостью орбиты спутника, находящегося в зените пункта наблюдений. Орбита спутника круговая с радиусом равным a . Влиянием возмущений в движении спутника пренебрежем.

Тогда положение пункта \mathbf{R} и спутника \mathbf{r}_1 представим как

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

В момент времени $t_2 = t_1 + \Delta t$, после того как спутник переместится в положение 2, пройдя по орбите дугу $\cup 12$, радиус-вектор положения спутника \mathbf{r}_2 можно выразить из прямоугольного треугольника $01'2$ следующим образом

$$\mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} a \cdot \cos M \\ a \cdot \sin M \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

где M – изменение средней аномалии положения спутника на орбите между первой и второй точками, которое находится через среднее движение n

$$M = n \cdot \Delta t. \quad (2.3)$$

Получим выражения для топоцентрических радиус-векторов спутника ρ_1, ρ_2 в моменты t_1, t_2

$$\rho_1 = \mathbf{r}_1 - \mathbf{R} = \begin{bmatrix} a - R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \rho_2 = \mathbf{r}_2 - \mathbf{R} = \begin{bmatrix} a \cdot \cos M - R \\ a \cdot \sin M \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Модули этих векторов равны

$$\rho_1 = a - R, \quad \rho_2 = [a^2 - 2 \cdot a \cdot R \cdot \cos M + R^2]^{1/2}, \quad (2.5)$$

поскольку M – малый угол (при $\Delta t = 30$ с $M \approx 1.5'$), тогда $\cos M = 1 - M^2 / 2$.

Изменение топоцентрического радиус-вектора за время Δt можно выразить как

$$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 = [a^2 - 2 \cdot a \cdot R \cdot \cos M + R^2]^{1/2} - (a - R). \quad (2.6)$$

Введем в положение пункта наблюдений малые по величине погрешности $d\xi$, $d\eta$ и $d\zeta$, то есть теперь положение пункта выражается как

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} R + d\xi \\ d\eta \\ d\zeta \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Новые топоцентрические векторы будут равны

$$\rho'_1 = \mathbf{r}_1 - \mathbf{R}' = \begin{bmatrix} a - R - d\xi \\ -d\eta \\ -d\zeta \end{bmatrix}, \quad \rho'_2 = \mathbf{r}_2 - \mathbf{R}' = \begin{bmatrix} a \cdot \cos M - R - d\xi \\ a \cdot \sin M - d\eta \\ -d\zeta \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

а их модули

$$\rho'_1 = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{R}'| = [(a - R - d\xi)^2 + d\eta^2 + d\zeta^2]^{1/2}, \quad (2.9)$$

$$\rho'_2 = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{R}'| = \{[a \cdot \cos M - R - d\xi]^2 + (a \cdot \sin M - d\eta)^2 + d\zeta^2\}^{1/2}. \quad (2.10)$$

После разложения выражений (2.9) и (2.10) в ряды Тейлора относительно $d\xi, d\eta, d\zeta$, ограничиваясь членами первого порядка, получаем

$$\rho'_1 = \rho_1 - d\xi, \quad (2.11)$$

$$\rho'_2 = \rho_2 - d\xi \cdot (a \cdot \cos M - R) / \rho_2 - d\eta \cdot a \cdot \sin M / \rho_2. \quad (2.12)$$

Из формулы (2.12) видно, что влияние погрешности $d\zeta$ в членах первого порядка отсутствует.

Теперь разность новых топоцентрических дальностей будет равна

$$\Delta\rho' = \rho'_2 - \rho'_1 = \rho_2 - \rho_1 - d\xi \cdot (a \cdot \cos M - R) / \rho_2 + d\xi - d\eta \cdot a \cdot \sin M / \rho_2, \quad (2.13)$$

а изменение этой разности из-за погрешности во взаимных положениях пункта и орбиты будет равно

$$\delta\Delta\rho = \Delta\rho' - \Delta\rho = -d\xi \cdot (a \cdot \cos M - R) / \rho_2 + d\xi - d\eta \cdot a \cdot \sin M / \rho_2. \quad (2.14)$$

Разложим в (2.15) тригонометрические функции от угла M в ряды Тейлора

$$\begin{aligned} \delta\Delta\rho = \Delta\rho' - \Delta\rho = & -d\xi \cdot (a \cdot [1 - (n \cdot \Delta t)^2 / 2] - R) / \rho_2 + \\ & + d\xi - d\eta \cdot a \cdot (n \cdot \Delta t) / \rho_2. \end{aligned} \quad (2.15)$$

В таблице 2.1 приводятся значения в изменении топоцентрической дальности $\delta\Delta\rho$ в зависимости от погрешностей $d\xi$ и $d\eta$, а также значения Δt . При расчетах принято: большая полуось $a = 26\,560$ км, $R = 6\,378$ км, $n = 30^\circ/\text{ч}$.

Таблица 2.1 – Абсолютные значения погрешностей приращений геометрических дальностей в зависимости от погрешностей во взаимном положении пункта и спутника и длительности интервала времени Δt

Погрешности во взаимном положении пункта и спутника, м	Абсолютные значения погрешностей приращения геометрической дальности при интервале времени Δt , мм						
	$\Delta t = 1$ с	$\Delta t = 2$ с	$\Delta t = 5$ с	$\Delta t = 10$ с	$\Delta t = 20$ с	$\Delta t = 30$ с	$\Delta t = 60$ с
$d\xi = d\eta = 1$	0,2	0,5	1	2	4	6	11
$d\xi = d\eta = 5$	1	2	5	10	19	29	57
$d\xi = d\eta = 10$	1,9	3,8	9,5	19	38	57	114

Из таблицы 2.1 видно, что во многих случаях абсолютные значения погрешностей приращений геометрических дальностей в зависимости от погрешностей во взаимном положении пункта и спутника не превосходят $\frac{1}{4}$ длины волны, то есть около 60 мм, и они могут быть использованы для контроля фазовых ГНСС измерений.

2.2 Общие сведения о методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений

Методика контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений была изложена в статьях [3, 5–6, 9–10]. Суть ее заключается в сравнении первых разностей фазовых псевдодальностей $\Delta\Phi$ с разностями $\Delta\tilde{\Phi}$, вычисленными (смоделированными) по первым разностям геометрических дальностей и атмосферных задержек. Фаза несущей измеряется ГНСС приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты и времени с относительной нестабильностью от $3 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-16} , что позволяет минимизировать величину погрешности часов приемника.

В результате сравнения измеренных и смоделированных данных рассчитывается некоторая тестовая величина, которая в дальнейшем анализируется на наличие потерь счета циклов или «пачек выбросов», путем

сравнения с заранее рассчитанной теоретической величиной. В случае обнаружения в измерениях потерь счета циклов или «пачек выбросов» производится их исправление. Для выявления и исправления одиночных потерь счета циклов, возникающих в фазовых ГНСС измерениях, применяется алгоритм медианного среднего, а для выявления и исправления «пачек выбросов», возникающих в фазовых ГНСС измерениях, применяется адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа.

Первые разности смоделированных геометрических дальностей вычисляются по приближенным координатам пункта и координатам спутника из навигационного сообщения. Алгоритм расчета координат спутников по навигационным данным представлен в 2.3. Приближенные координаты пункта наблюдения содержатся в заголовке универсального обменного формата RINEX ГНСС данных. Кроме того, по данным точных эфемерид, которые представляются Международной ГНСС службой спустя 15-18 дней, и точным координатам пункта наблюдения, полученных из привязки к станциям МГС, можно смоделировать приращения геометрических дальностей с погрешностью шума фазовых наблюдений (несколько миллиметров). Алгоритм расчета координат спутников по точным эфемеридам представлен в 2.3.

Учет атмосферных задержек необходим для повышения надежности выявления потерь счета циклов в фазовых ГНСС измерениях, поскольку их влияние, как было показано ранее в 1.9 не является пренебрежимо малым.

Для учета дифференциального влияния в тропосферной задержке предлагается использовать простейшую функцию отображения в виде косеканса высоты спутника [9], учет дифференциальной ионосферной задержки осуществляется с использованием данных, представленных в файле IONEX, или в случае двухчастотных измерений с помощью алгоритма, приведенного в 2.3.

Разработанная методика контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений поясняется общей схемой, представленной на рисунке 2.2.

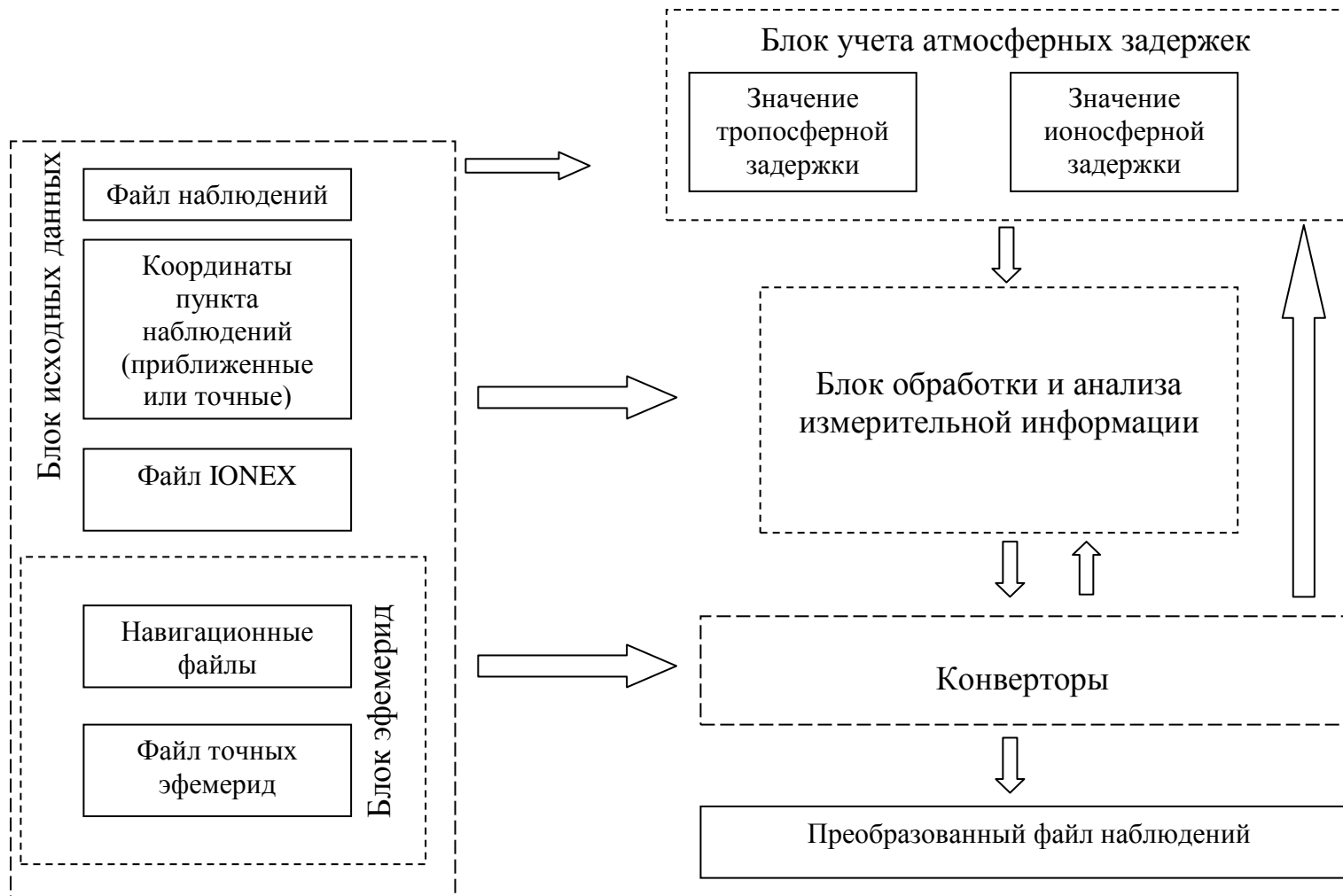


Рисунок 2.2 – Общая схема разработанной методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений

В разработанной методике контроля фазовых ГНСС измерений выделяют четыре основных блока: блок эфемерид, блок исходных данных, блок учета атмосферных задержек и блок обработки измерительной информации, также в блок-схеме присутствуют программы конверторы. Четыре основных блока разработанной методики взаимодействуют следующим образом.

Из блока исходных данных в блок учета атмосферных задержек поступают файлы эфемерид, наблюдений и файл IONEX.

Предварительно с использованием файлов эфемерид и файл наблюдений в конвертере posCalc.exe рассчитываются координаты спутника в каждый момент наблюдений. В блоке учета атмосферных задержек происходит вычисление тропосферной и ионосферной задержек. Затем данные атмосферных задержек и эфемерид спутников поступают в блок обработки и анализа измерительной информации.

Кроме атмосферных задержек и эфемерид спутников в блок обработки и анализа измерительной информации поступает конвертированный файл наблюдений и координаты пункта наблюдений (приближенные или точные). Далее в блоке обработки и анализа измерительной информации моделируются первые разности, которые затем сравниваются с измеренными. В результате сравнения измеренных и смоделированных первых разностей рассчитывается некоторая тестовая величина, которая в дальнейшем анализируется на наличие потерь счета циклов или «пачек выбросов». После обнаружения одиночных потерь счета циклов или «пачек выбросов» измеренные данные редактируются. Отредактированный файл наблюдений посредством конвертора преобразуется в файл наблюдений, близкий к исходному.

Отличительной особенностью разработанной методики является возможность использования разнообразной измерительной информации для обнаружения потерь счета циклов и «пачек выбросов» в фазовых ГНСС измерениях.

2.3 Алгоритмы, используемые в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений

Алгоритмы расчета координат спутников ГНСС по навигационным данным. Для вычисления положения спутника на орбите по навигационным данным в системах GPS, GALILEO и Beidou применяется аналитический метод расчета координат, основанный на Кеплеровых элементах орбит [95–97], в системе ГЛОНАСС реализован метод численного интегрирования прямоугольных координат, скоростей и ускорений спутников [19–20]. В обоих методах учитываются вековые и периодические возмущения, в том числе и от сжатия Земли, представленного второй зональной гармоникой геопотенциала C_{20} .

В аналитическом методе вычисления положений спутников GPS, GALILEO и Beidou входными параметрами являются:

- $A0, A1, A2$ – коэффициенты для расчета поправки часов спутника, с;
- C_{rs} – поправка в синусоидальную составляющую радиус-вектора космического аппарата, м;
- Δn – поправка в среднее движение спутника, рад/с;
- M_0 – средняя аномалия спутника, рад;
- C_{uc} – поправка в косинусоидальную составляющую аргумента широты, рад;
- e – эксцентриситет орбиты;
- C_{us} – поправка в синусоидальную составляющую аргумента широты, рад;
- a – большая полуось орбиты спутника, м;
- t_{oe} – опорное время системы GPS, Beidou или GALILEO, с;
- C_{ic} – поправка в косинусоидальную составляющую угла наклона орбиты, рад;
- Ω_0 – долгота восходящего узла в 0^h UTC в воскресенье каждой текущей недели;

- C_{is} – поправка в синусоидальную составляющую угла наклона орбиты, рад;
- i_0 – наклонение орбиты к плоскости экватора, рад;
- C_{rc} – поправка в косинусоидальную составляющую радиус-вектора космического аппарата, м;
- ω – аргумент перигея спутника, рад;
- $\dot{\omega}$ – скорость изменения долготы восходящего узла, рад/с;
- \dot{i} – скорость изменения наклонения орбиты, рад/с;

Вычисление координат спутника в заданной геоцентрической системе отсчета на момент выхода сигнала производится в следующем порядке.

Рассчитывается поправка для перехода от бортовой шкалы времени к системному времени GPST, если спутниковая навигационная система GPS, GST, если спутниковая навигационная система GALILEO, или BDT, если спутниковая навигационная система Beidou

$$dt^{sat} = A0 + A1 \cdot (t - t_{oe}) + A2 \cdot (t - t_{oe})^2 + \Delta t_{rel} . \quad (2.16)$$

В формуле (2.16) t – время выхода сигнала, t_{oe} – опорное время системы GPS, GALILEO или Beidou, Δt_{rel} – поправка за релятивистский эффект.

Затем определяется промежуток между опорным временем системы GPS, GALILEO или Beidou и временем излучения сигнала

$$tk = t - t_{oe} - dt^{sat} . \quad (2.17)$$

Если tk больше чем 302 400 с, то $tk=tk-604\ 800$, если tk меньше чем 302 400 с, то $tk=tk+604800$.

Находится большая полуось и среднее движение спутника

$$a = (\sqrt{a})^2, \quad n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}, \quad n = n_0 + \Delta n. \quad (2.18)$$

где μ – гравитационная геоцентрическая постоянная Земли.

Вычисляется средняя аномалия спутника на момент выхода сигнала t

$$M = M_0 + n \cdot tk. \quad (2.19)$$

Через уравнение Кеплера методом последовательных приближений находится эксцентрическая аномалия спутника E

$$E = M + e \cdot \sin E. \quad (2.20)$$

Для упрощения расчетов уравнение Кеплера разлагается в ряд и находится эксцентрическая аномалия спутника E по формуле

$$E = M + e \cdot \sin E + \frac{1}{2} \cdot e^2 \cdot \sin 2M + \dots \quad (2.21)$$

Далее вычисляется поправка за релятивистский эффект

$$\Delta t_{rel} = \frac{-2 \cdot \sqrt{\mu} \cdot \sqrt{a} \cdot e \cdot \sin E}{c^2}. \quad (2.22)$$

После этого повторяются все шаги до вычисления поправки за релятивистский эффект.

Определяется истинная аномалия ν , с учетом четверти, в которой расположен угол ν .

$$\cos v = \frac{\cos E - e}{1 - e \cdot \cos E}, \quad \sin v = \frac{\sqrt{1 - e^2} \cdot \sin E}{1 - e \cdot \cos E}. \quad (2.23)$$

Находится невозмущенный аргумент широты

$$\Phi = v + \omega, \quad (2.24)$$

с полученной величиной вычисляются короткопериодические возмущения аргумента широты δu , радиус-вектора δr и наклоения δi

$$\begin{aligned} \delta u &= C_{us} \cdot \sin 2\Phi + C_{uc} \cdot \cos 2\Phi, \\ \delta r &= C_{rs} \cdot \sin 2\Phi + C_{rc} \cdot \cos 2\Phi, \\ \delta i &= C_{is} \cdot \sin 2\Phi + C_{ic} \cdot \cos 2\Phi, \end{aligned} \quad (2.25)$$

и определяются возмущенные параметры движения спутника – аргумент широты u , радиус-вектор r и наклонение i

$$u = \Phi + \delta u, \quad r = a \cdot (1 - e \cdot \cos E) + \delta r, \quad i = i_0 + \delta i + \dot{i} \cdot tk. \quad (2.26)$$

После этого находятся орбитальные координаты спутника X^{orb} , Y^{orb} , Z^{orb} .

$$X^{orb} = r \cdot \cos u, \quad Y^{orb} = r \cdot \sin u, \quad Z^{orb} = 0. \quad (2.27)$$

Вычисляется истинная долгота восходящего узла орбиты

$$\Omega = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_{earth}) \cdot tk - \dot{\Omega}_{earth} \cdot tk. \quad (2.28)$$

Находятся координаты спутника в геоцентрической системе координат ITRF, GTRF, или CGCS2000 без учета поправки за поворот Земли за время прохождения сигнала

$$\left. \begin{aligned} x^{sat} &= X^{orb} \cdot \cos\Omega - Y^{orb} \cdot \cos i \cdot \sin\Omega \\ y^{sat} &= X^{orb} \cdot \sin\Omega + Y^{orb} \cdot \cos i \cdot \cos\Omega \\ z^{sat} &= Y^{orb} \cdot \sin i \end{aligned} \right\}. \quad (2.29)$$

Вводят поправку за поворот Земли (так называемый эффект Sagnac) и определяют координаты спутника в инерциальной системе отсчета [46].

В численном интегрировании входными параметрами являются x^{sat} , y^{sat} , z^{sat} – геоцентрические координаты спутника в системе ПЗ–90.02, V_x^{sat} , V_y^{sat} , V_z^{sat} – скорости движения спутника, a_x^{sat} , a_y^{sat} , a_z^{sat} – лунно-солнечные ускорения.

В ИКД ГЛОНАСС представлены два алгоритма расчета координат спутников на момент выхода сигнала: приближенный и точный. Рассмотрим более подробно приближённый алгоритм расчёта координат спутников.

$$\begin{aligned} \frac{dX^{sat}}{dt} &= V_x^{sat}, \\ \frac{dY^{sat}}{dt} &= V_y^{sat}, \\ \frac{dZ^{sat}}{dt} &= V_z^{sat}, \\ \frac{dV_x^{sat}}{dt} &= -\frac{\mu}{r^3} \cdot X^{sat} + \frac{3}{2} \cdot C_{20} \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{r^5} \cdot X^{sat} \cdot \left(1 - \frac{5 \cdot (Z^{sat})^2}{r^2}\right) + \\ &\quad \omega^2 \cdot X^{sat} + 2 \cdot \omega \cdot V_y^{sat} + a_x^{sat}, \\ \frac{dV_y^{sat}}{dt} &= -\frac{\mu}{r^3} \cdot Y^{sat} + \frac{3}{2} \cdot C_{20} \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{r^5} \cdot Y^{sat} \cdot \left(1 - \frac{5 \cdot (Z^{sat})^2}{r^2}\right) + \\ &\quad \omega^2 \cdot Y^{sat} - 2 \cdot \omega \cdot V_x^{sat} + a_y^{sat}, \\ \frac{dV_z^{sat}}{dt} &= -\frac{\mu}{r^3} \cdot Z^{sat} + \frac{3}{2} \cdot C_{20} \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{r^5} \cdot Z^{sat} \cdot \left(3 - \frac{5 \cdot (Z^{sat})^2}{r^2}\right) + a_z^{sat}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

где μ – гравитационная геоцентрическая постоянная Земли;

C_{20} – коэффициент второй зональной гармоники разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям;

a – экваториальный радиус Земли;

ω – угловая скорость вращения Земли.

Интегрирование дифференциальных уравнений первого рода $y' = f(x, y)$ с помощью метода Рунге-Кутты четвёртого порядка выполняется на основании следующих итерационных формул [57, 88]

$$y_{n+1} = y_n + \frac{(K_0 + 2 \cdot K_1 + 2 \cdot K_2 + K_3)}{6}, \quad (2.31)$$

$$K_0 = t_i \cdot f(x_n, y_n),$$

$$K_1 = t_i \cdot f(x_n + 0.5 \cdot t_i, y_n + 0.5 \cdot K_0),$$

$$K_2 = t_i \cdot f(x_n + 0.5 \cdot t_i, y_n + 0.5 \cdot K_1),$$

$$K_3 = t_i \cdot f(x_n + 0.5 \cdot t_i, y_n + 0.5 \cdot K_2). \quad (2.32)$$

Основное отличие приближенного алгоритма от точного в том, что гравитационные возмущения, вызванные влиянием Луны и Солнца, рассчитываются на основе строгих математических формул, а в приближенном алгоритме используются лунно-солнечные ускорения, заложенные в навигационном сообщении.

Алгоритмы расчета координат спутников систем ГЛОНАСС и GPS на основе точных эфемерид Международной ГНСС службы. Точные эфемериды для систем ГЛОНАСС и GPS представлены SP3-с файлами, которые содержат положения $(X^{sat}, Y^{sat}, Z^{sat})$ и относительные ошибки часов спутника на каждые 15 мин в системе координат ITRF [140]. Для получения положения спутника на необходимую эпоху t следует выполнить интерполяцию на заданный момент наблюдения.

Существуют десятки методов интерполяции данных. В спутниковых технологиях используются в основном два. Это метод Лагранжа и метод Ньютона-Нейвилла [91, 124]. Другие методы интерполяции данных IGS орбит представлены в работе [128].

Метод Лагранжа основан на следующей формуле

$$y(t) = \sum_{i=0}^n L_i(t) \cdot y_i, \quad (2.33)$$

где

$$L_i(t) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \left(\frac{t - t_j}{t_i - t_j} \right), \quad (2.34)$$

где символ \prod обозначает оператор сложения от $j = 0$ до $j = n$;

n – степень интерполяции полинома;

$y(t_i)$ – положение спутника на известный момент t_i ;

$L_i(t)$ – базовая функция со степенью n ;

t – момент времени, на которое будет произведена интерполяция данных.

Для интерполяции IGS орбит степень полинома обычно выбирается от семи до девяти [140].

Метод Ньютона-Нейвилла основан на следующих соотношениях [124]:

$$p_{j,j}(t) = x_j, \quad (2.35)$$

$$p_{j,k}(t) = \frac{(t_k - t) \cdot p_{j,k-1}(t) + (t - t_j) \cdot p_{j+1,k}(t)}{t_k - t_j}. \quad (2.36)$$

В формулах (2.35) – (2.36):

j – число, которое принимает значения от i до $i+n$;

k – число, принимающее значение i до $i+n$, при чем $k > j$.

Алгоритм учета дифференциального влияния тропосферной задержки. В работе [10] был представлен алгоритм учета дифференциального влияния тропосферной задержки для применения его в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений.

Суть алгоритма заключается в следующем. Вначале рассчитывается среднее значение полной зенитной задержки, состоящей из суммы гидростатической и влажной задержек. После этого с учетом высоты спутника h_i рассчитывается значение наклонных тропосферных задержек, затем между смежными эпохами образуются разности.

Для расчета зенитной гидростатической задержки (в линейной мере) используем выражение [80]

$$T_{z,h} = \frac{[0,0022768 \pm 0,0000005] \cdot p}{1 - 0,00266 \cdot \cos 2B - 0,00028 \cdot H^s}, \quad (2.37)$$

где B – геодезическая широта пункта наблюдения,

H^s – ортометрическая высота пункта в километрах,

p – атмосферное давление в миллибарах у опорной точки на антенне.

При отсутствии метеоданных атмосферное давление можно найти, используя модель стандартной атмосферы [1, 4]

$$p = 1013,25 \cdot (1 - 0,0226 \cdot H)^{5,226}. \quad (2.38)$$

Зенитную влажную задержку $T_{z,w}$, изменяющуюся от 0,1 до 0,4 м [1, 4], принимают равной 0,1 м. Тогда полная зенитная задержка T_z находится как

$$T_z = T_{z,h} + T_{z,w}. \quad (2.39)$$

Переход от полной зенитной задержки к соответствующим наклонным задержкам выполняется с помощью формулы

$$\left(T_{rec}^{sat}\right)_i = T_z \cdot \operatorname{cosec} h_i, \quad (2.40)$$

а изменение в тропосферной задержке между эпохами находится по формуле

$$\left(\Delta T_{rec}^{sat}\right)_{i,i+1} = T_z \cdot (\operatorname{cosec} h_{i+1} - \operatorname{cosec} h_i). \quad (2.41)$$

Высоты спутника над горизонтом h_i могут быть вычислены через геодезические координаты пункта наблюдения B_{st} , L_{st} и топоцентрические прямоугольные координаты спутника N_i , E_i , U_i [1]

$$\begin{bmatrix} E_i \\ N_i \\ U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin L_{st} & \cos L_{st} & 0 \\ -\sin B_{st} \cdot \cos L_{st} & -\sin B_{cm} \cdot \sin L_{st} & \cos B_{st} \\ \cos B_{st} \cdot \cos L_{st} & \cos B_{st} \cdot \sin L_{st} & \sin B_{st} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{rec} - x^{sat} \\ Y_{rec} - y^{sat} \\ Z_{rec} - z^{sat} \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

$$h_i = \operatorname{arctg}\left(\frac{U_i}{\sqrt{E_i^2 + N_i^2}}\right). \quad (2.43)$$

Алгоритм учета дифференциального влияния ионосферной задержки с использованием модели IONEX (для одночастотных или двухчастотных данных). Для учета дифференциального влияния ионосферной задержки предлагается использовать внешнюю измерительную информацию, которая предоставляется Международной ГНСС службой (IGS), в виде файла оценок концентрации электронов в ионосфере (файлы CODE IONEX) [105].

Рассмотрим алгоритм вычисления ионосферной задержки с использованием файлов IONEX.

На рисунке 2.3 представлена однослойная модель ионосферы,

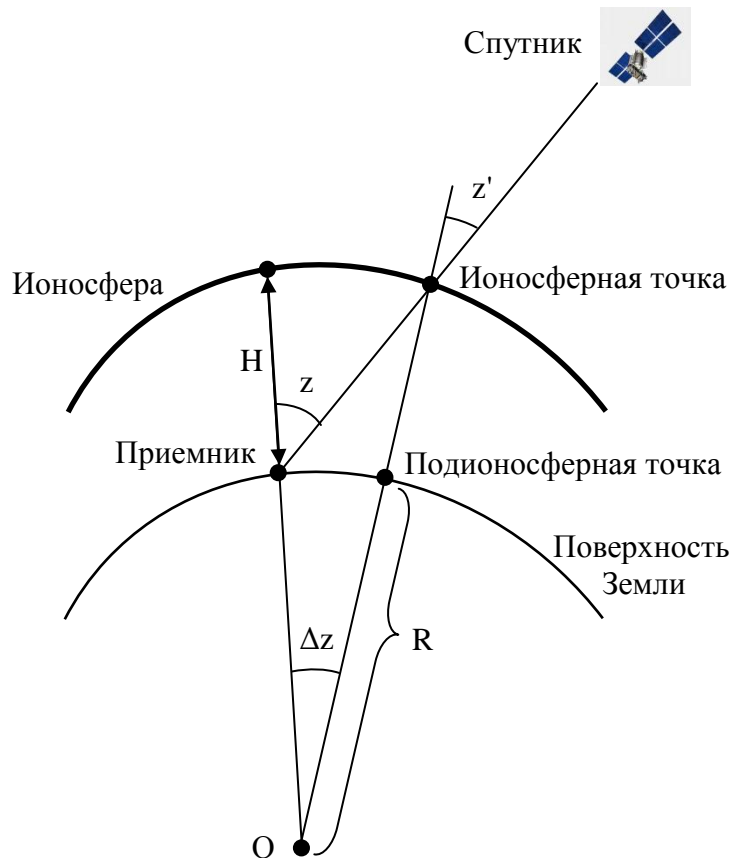


Рисунок 2.3 – Однослойная модель ионосферы

где z – зенитное расстояние спутника в точке наблюдения;
 z' – зенитное расстояние спутника в ионосферной точке;
 R – средний радиус Земли, равный 6371 км;
 H – высота ионосферного слоя, принятая равной 450 км;
 O – центр масс Земли;
 Δz – центральный угол между точкой наблюдения и спутником.

Алгоритм расчета ионосферной задержки с использованием данных модели IONEX состоит из нескольких последовательных операций:

– расчет центрального угла между точкой наблюдения и спутником [27]

$$\Delta z = z - z' = \frac{\pi}{2} - h - \arcsin\left(\frac{(R + H_{st}) \cdot \cosh}{(R + H_{st})}\right), \quad (2.44)$$

где H_{st} – геодезическая высота в точке наблюдения;

– вычисление широты и долготы ионосферной точки

$$\beta_{ИТ} = \arcsin(\sin(B_{st}) \cdot \cos(\Delta z) + \cos(B_{st}) \cdot \sin(\Delta z) \cdot \cos \alpha), \quad (2.45)$$

где B_{st} – геодезическая широта в точке наблюдения, α – азимут направления на спутник.

В случае если $\beta_{ИТ} > 88^\circ$, то принять $\beta_{ИТ} = 88^\circ$.

$$\lambda_{ИТ} = L_{st} + \arcsin\left(\frac{\sin(\Delta z) \cdot \sin \alpha}{\cos(\beta_{ИТ})}\right), \quad (2.46)$$

где L_{st} – геодезическая долгота в точке наблюдения;

– расчет вертикальной электронной концентрации с использованием ТЕС карт.

В описании формата IONEX [98] для определения вертикальной электронной концентрации предлагается три варианта вычисления. Во всех трех вариантах вычисления величина VTEC представляется как функция от географических координат ионосферной точки ($\varphi_{ИТ}$, $\lambda_{ИТ}$) и всемирного координированного времени (t_{UTC}).

Первый вариант: «простая» ТЕС карта.

В данном варианте вертикальная электронная концентрация (VTEC) вычисляется по формуле

$$VTEC(\beta_{ИТ}, \lambda_{ИТ}, t_{UTC}) = VTEC_i(\beta_{ИТ}, \lambda_{ИТ}), \quad (2.47)$$

при условии, что $|t_{UTC} - T_i| = \min$, T_i – заданная эпоха наблюдений.

Второй вариант: интерполирование между двумя смежными ТЕС картами.

Во втором варианте вычислений расчет вертикальной электронной концентрации осуществляется по формуле

$$\begin{aligned} VTEC(\beta_{ИТ}, \lambda_{ИТ}, t_{UTC}) = & \left(\frac{T_{i+1} - t_{UTC}}{T_{i+1} - T_i} \right) \cdot VTEC_i(\beta_{ИТ}, \lambda_{ИТ}) + \\ & + \left(\frac{t_{UTC} - T_i}{T_{i+1} - T_i} \right) \cdot VTEC_{i+1}(\beta_{ИТ}, \lambda_{ИТ}), \end{aligned} \quad (2.48)$$

при условии $T_i \leq t_{UTC} \leq T_{i+1}$.

Третий вариант: интерполирование между смежными чередующимися ТЕС картами.

В третьем варианте вертикальная электронная концентрация (VTEC) вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} VTEC(\beta_{ИТ}, \lambda_{ИТ}, t_{UTC}) = & \left(\frac{T_{i+1} - t_{UTC}}{T_{i+1} - T_i} \right) \cdot VTEC_i(\beta_{ИТ}, \lambda'_i) + \\ & + \left(\frac{t_{UTC} - T_i}{T_{i+1} - T_i} \right) \cdot VTEC_{i+1}(\beta_{ИТ}, \lambda'_{i+1}), \end{aligned} \quad (2.49)$$

при условии $T_i \leq t_{UTC} \leq T_{i+1}$. В формуле (2.50) λ'_i определяется выражением

$$\lambda'_i = \lambda_{ИГ} + (t_{UTC} - T_i). \quad (2.50)$$

Описанные варианты вычисления вертикальной электронной концентрации (VTEC) реализованы в библиотеке GPSTk [89];

– расчет вертикальной ионосферной задержки (I_v).

$$I_v = \frac{40,3 \cdot VTEC(\beta_{ИГ}, \lambda_{ИГ}, t_{UTC}) \cdot 10^{16 + exponent}}{f_i^2}, \quad (2.51)$$

где f_i – несущие частоты систем ГЛОНАСС или GPS;

– расчет наклонной ионосферной задержки (I_{sl}).

$$I_{sl} = \frac{I_v}{\sqrt{1 - \cos^2(h)}}, \quad (2.52)$$

где h – высота спутника над горизонтом.

Изменения в ионосферной задержке будет определяться как

$$\left(\Delta I_{rec}^{sat}\right)_{i,i+1} = I_{sl}(t_{i+1}) - I_{sl}(t_i), \quad (2.53)$$

где $i=1,2\dots n$.

Алгоритм учета дифференциального влияния ионосферной задержки с использованием двухчастотных фазовых ГНСС измерений. В работе [59–60] предложен алгоритм учета дифференциального влияния ИЗ с использованием двухчастотных фазовых ГНСС псевдодалностей, полученных приемником, подключенным к атомному стандарту частоты.

В предложенном алгоритме используется уравнение разности фазовых ГНСС псевдодалностей

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{rec,L1}^{sat}(t_1,t_2) = & \Delta\rho_{rec}^{sat}(t_1,t_2) - \Delta I_{rec,L1}^{sat}(t_1,t_2) + \Delta T_{rec}^{sat}(t_1,t_2) + \Delta\delta m_{rec}^{sat}(t_1,t_2) + \\ & + c \cdot [\Delta dt_{rec}(t_1,t_2) - \Delta dt^{sat}((t_1 - \tau_{rec,L1}^{sat}), (t_2 - \tau_{rec,L1}^{sat}))]. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Так как ионосферные задержки I_{L1} и I_{L2} на диапазонах частот $L1$ и $L2$, представленные в линейной мере, связаны соотношением

$$I_{L2} = \frac{f_1^2}{f_2^2} \cdot I_{L1}, \quad (2.55)$$

то разность фазовых ГНСС псевдодальностей $\Delta\Phi_{rec,L2}^{sat}(t_1,t_2)$ между эпохами на втором диапазоне частот принимает вид

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{rec,L2}^{sat}(t_1,t_2) = & \Delta\rho_{rec}^{sat}(t_1,t_2) - \Delta I_{rec,L1}^{sat}(t_1,t_2) \cdot \frac{f_1^2}{f_2^2} + \Delta T_{rec}^{sat}(t_1,t_2) + \\ & + \delta m_{rec}^{sat}(t_1,t_2) + c \cdot [\Delta dt_{rec}(t_1,t_2) - \Delta dt^{sat}((t_1 - \tau_{rec,L1}^{sat}), (t_2 - \tau_{rec,L2}^{sat}))]. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Влияние многолучевости $\Delta\delta m$ пренебрежимо мало на интервале наблюдений до 60 с. При образовании разности фаз $\nabla\Phi_{rec,L1,L2}^{sat}(t_1,t_2)$ исключаются тропосферные задержки

$$\begin{aligned} \nabla\Phi_{rec,L1,L2}^{sat}(t_1,t_2) = & \Delta\Phi_{rec,L2}^{sat}(t_1,t_2) - \Delta\Phi_{rec,L1}^{sat}(t_1,t_2) = \\ = & \Delta I_{rec,L1}^{sat}(t_1,t_2) \cdot \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right) + \\ & + c \cdot [\Delta dt_{rec}(t_1,t_2) - \Delta dt^{sat}(t_1 - \tau_{rec,L2}^{sat}, t_2 - \tau_{rec,L2}^{sat})] - \\ & - c \cdot [\Delta dt_{rec}(t_1,t_2) - \Delta dt^{sat}(t_1 - \tau_{rec,L1}^{sat}, t_2 - \tau_{rec,L1}^{sat})]. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Выполним исследование влияния погрешностей времени ∇t в уравнении (2.57)

$$\begin{aligned} \nabla t = & +c \cdot [\Delta dt_{rec}(t_1, t_2) - \Delta dt^{sat}(t_1 - \tau_{rec, L2}^{sat}, (t_2 - \tau_{rec, L2}^{sat}))] - \\ & - c \cdot [\Delta dt_{rec}(t_1, t_2) - \Delta dt^{sat}(t_1 - \tau_{rec, L1}^{sat}, (t_2 - \tau_{rec, L1}^{sat}))]. \end{aligned} \quad (2.58)$$

Различие между первым и вторым членом в правой части уравнения (2.58) только в изменении сдвигов шкал приемника и спутника за время, равное разности распространения сигнала τ на двух частотах, то есть

$$\begin{aligned} \nabla t = & +c \cdot [-\Delta dt^{sat}(t_1 - \tau_{rec, L2}^{sat}, (t_2 - \tau_{rec, L2}^{sat}))] - \\ & - c \cdot [-\Delta dt^{sat}(t_1 - \tau_{rec, L1}^{sat}, (t_2 - \tau_{rec, L1}^{sat}))], \end{aligned} \quad (2.59)$$

что объясняется разными значениями ионосферных задержек на двух частотах.

Величиной ∇t пренебрегаем. Таким образом,

$$\begin{aligned} \nabla \Phi_{rec, L1, L2}^{sat}(t_1, t_2) &= \Delta \Phi_{rec, L2}^{sat}(t_1, t_2) - \Delta \Phi_{rec, L1}^{sat}(t_1, t_2) = \\ &= \Delta I_{rec, L1}^{sat}(t_1, t_2) \cdot \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right). \end{aligned} \quad (2.60)$$

Для системы GPS величина $\frac{f_1^2}{f_2^2} = 1,6469$, для системы ГЛОНАСС – $\frac{f_1^2}{f_2^2} = 1,65306$.

Из формулы (2.60) получаем

$$\Delta I_{rec, L1}^{sat}(t_1, t_2) = \left[\Delta \Phi_{rec, L2}^{sat}(t_1, t_2) - \Delta \Phi_{rec, L1}^{sat}(t_1, t_2) \right] / \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right). \quad (2.61)$$

Для второго диапазона частот с учетом формулы (2.55) находим

$$\Delta I_{rec, L2}^{sat}(t_1, t_2) = \Delta I_{rec, L1}^{sat}(t_1, t_2) \cdot \frac{f_1^2}{f_2^2}. \quad (2.62)$$

Предложенный в работе [60] алгоритм учета дифференциального влияния ионосферной задержки с использованием двухчастотных фазовых ГНСС измерений, полученных приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты, был протестирован на четырёх станциях (NOVM, CRO1, COCO, TAN2) Международной ГНСС службы (IGS), расположенных в различных точках земного шара. Результаты исследования приведены в приложении В и опубликованы в указанной статье.

2.4 Методы фильтрации данных в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений

Алгоритм медианного среднего в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений. Алгоритм медианного среднего включает в себя несколько последовательных действий:

а) вычисление невязок v_i между измеренными первыми разностями фаз $\Delta\phi_i$, и смоделированными $\Delta\tilde{\phi}_i$

$$v_i = \Delta\phi_i - \Delta\tilde{\phi}_i; \quad (2.63)$$

б) выделение из каждой невязки v_i систематической и случайной составляющей

$$v_i = \Delta d_i + \Delta\varepsilon_i, \quad (2.64)$$

$$\Delta d_i = E(v_i), \quad (2.65)$$

где Δd_i – приращение оценки систематической погрешности модели фазовых ГНСС измерений, равное математическому ожиданию невязки $E(v)$;

$\Delta \varepsilon_i$ – оценка случайного изменения погрешности фазовых измерений на интервале, характеризуемая нулевым математическим ожиданием;

в) оценка систематической составляющей путем сглаживания ряда значений невязок v_i на скользящем интервале $[i - k, i + k]$

$$\Delta d_i = \bar{v}_{[i-k, i+k]}; \quad (2.66)$$

г) обнаружение потерь счета циклов в случайной составляющей погрешности $\Delta \varepsilon_i$ при следующих условиях

$$|\Delta \varepsilon_j| > 2 \cdot \sigma_i \text{ или } |\Delta \varepsilon_j| > \Sigma. \quad (2.67)$$

В формуле (2.68) Σ – среднеквадратическая погрешность, характеризующая точность моделирования первых разностей фаз, σ_i – среднеквадратическая погрешность, рассчитывается по формуле Бесселя

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=i-k}^{i+k} \Delta \varepsilon_j^2}{2k}}, \quad (2.68)$$

где k – скользящий интервал.

Среднеквадратическая погрешность, характеризующая точность моделирования первых разностей фаз, определяется как

$$\Sigma = \sqrt{\sigma_{\Delta T}^2 + \sigma_{\Delta l}^2 + \sigma_{\Delta \rho}^2 + \sigma_{\Delta t}^2}, \quad (2.69)$$

где $\sigma_{\Delta T}$, $\sigma_{\Delta I}$, $\sigma_{\Delta \rho}$ – среднеквадратические погрешности моделирования тропосферной и ионосферной задержек, приращения геометрических дальностей;

$\sigma_{\Delta t}$ – среднеквадратическая погрешность нестабильности ч приемника и спутника.

В статье [9] приведены формулы оценок СКП моделирования тропосферной и ионосферной задержек, приращения геометрических дальностей, нестабильности часов приемника и спутника;

д) исправление фазового отсчета $\bar{\phi}_i$ из-за одиночной потери счета циклов

$$\bar{\phi}_i = \text{int}(\phi_i) + \text{frac}(\tilde{\phi}_i), \quad (2.70)$$

где int – оператор выделения целой части числа, а frac – выделение дробной части числа;

е) исправление фазовых отсчетов в случае разрыва (в течение некоторого времени)

$$\bar{\phi}_{i+1} = \tilde{\phi}_i + \Delta\phi_{i+1} + \Delta d_{i+1}, \quad (2.71)$$

где $\bar{\phi}_{i+1}$ – сглаженное значение измеряемой величины;

$\tilde{\phi}_i$ – измеренное значение в предыдущую эпоху.

Систематическая составляющая Δd_{i+1} прогнозируется на последующие эпохи на основе предположения, что данная величина меняется линейно.

Адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа. Рассмотрим уравнение приращений фаз $\Delta\phi$ для частотного диапазона L1 за интервал времени Δt согласно формуле (1.6) [35].

Введем следующие обозначения: $\Delta\phi_{i,i+1}(L1) = z(k)$, а $\Delta\rho_{i,i+1} = x(k)$, где $z(k)$ и $x(k)$ соответствуют фиксированию процессов $z(t_k)$ и $x(t_k)$ на моменты времени t_k , $k = 0, 1, 2, \dots$ с шагом $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ [14, 58].

Процесс $x(k)$ описывается следующим дискретным уравнением [69, 135]

$$x(k+1) = x(k) + \eta(k), \quad x(0) = x_0, \quad (2.72)$$

в котором $x(k)$ – функция $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$.

Дисперсия процесса $x(k)$ определяется эмпирическим путем [135]. В диссертации профессора Толстикова А. С. [58] выполнена оценка возможной величины дисперсии процесса $x(k)$. Для фазовых наблюдений СКП единичного измерения равна 4 см, тогда для первых разностей фазовых ГНСС наблюдений $\sigma_\eta = 4 \cdot \sqrt{2}$ см.

Уравнение измерений $z(k)$ имеет вид

$$z(k+1) = x(k) + v(k), \quad (2.73)$$

в уравнении (2.73) $v(k)$ – центрированная дискретная случайная последовательность, содержащая потери счета циклов, на интервалах отсутствия потерь счета циклов процесс $v(k)$ имеет ограниченную дисперсию.

Для оценивания случайного процесса $x(k)$ по текущим измерениям $z(k)$ строится адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа [14]

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + K(k+1) \cdot [z(k+1) - \hat{x}(k)], \quad \hat{x}(0) = \hat{x}_0. \quad (2.74)$$

$$K(k+1) = \frac{c_v(k) \cdot \sigma_e^2(k+1/k)}{c_v(k) \cdot \sigma_e^2(k+1/k) + \sigma_v^2(k)}, \quad (2.75)$$

$$\sigma_e^2(k+1/k) = \sigma_e^2(k) + \sigma_\eta^2(k), \quad \sigma_e^2(0) = \sigma_{x_0}^2, \quad (2.76)$$

$$\sigma_e^2(k+1) = [1 - K(k+1)] \cdot \sigma_e^2(k), \quad (2.77)$$

где $K(k+1)$ – коэффициент усиления,

$\sigma_e^2(k+1)$, $\sigma_e^2(k+1/k)$ – дисперсии ошибок оценивания и ошибок предсказания оценки,

c_v – некоторый коэффициент.

СКП σ_v измерений будет складываться из погрешностей моделирования приращений геометрических дальностей, атмосферных задержек, погрешностей ч спутника и приемника [9]

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{\Delta T}^2 + \sigma_{\Delta l}^2 + \sigma_{\Delta \rho}^2 + \sigma_{\Delta t}^2}. \quad (2.78)$$

Коэффициент c_v в уравнении (2.75) находится из условия

$$c_v = 1, \text{ если } \rho(k) \leq 3,8 \text{ или } c_v = \frac{\rho(k)}{3,8}, \text{ если } \rho(k) > 3,8. \quad (2.79)$$

В формуле (2.79) $\rho(k)$ вычисляются следующим образом

$$\rho(k) = \frac{(z_{k+1} - \hat{x}(k))^2}{\sigma_e^2(k) + \sigma_v^2(k)}. \quad (2.80)$$

Для корректной работы адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа необходимо исключить выбросы из данных измерений $z(k)$ на основе следующего условия

$$|q(k)| = |z(k) - \hat{x}(k)| \leq 3 \cdot \sigma_v. \quad (2.81)$$

Если величина $|q(k+1)|$ оказывается больше заданного порогового значения, то коэффициент усиления K на шаге $k+1$ присваиваются нулевые значения, и оценка $\hat{x}(k+1)$ считается в виде прогноза от значения $x(k)$.

В случае наличия «пачек выбросов» возникает вероятность накопления ошибок прогнозирования. Для устранения этой проблемы обработка измерений производит в прямом и обратном направлении.

2.5 Выводы по второму разделу

Выполнено обоснование применения методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений для обнаружения потерь счета циклов на этапе предварительной обработки данных. Доказано, что во многих случаях абсолютные значения погрешностей приращений геометрических дальностей в зависимости от погрешностей во взаимном положении пункта и спутника не превосходят $\frac{1}{4}$ длины волны, то есть около 60 мм, и они могут быть использованы для контроля фазовых ГНСС измерений.

Разработана методика контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, которая заключается в сравнении первых разностей фазовых псевдодальностей, измеренных одиночным ГНСС приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты и времени, с относительной нестабильностью от $3 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-16} , с вычисленными

(смоделированными) первыми разностями геометрических дальностей и атмосферных задержек.

Обобщены алгоритмы для вычисления первых разностей геометрических дальностей на основе навигационных сообщений ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU, а также на основе точных эфемерид Международной ГНСС службы.

Разработаны алгоритмы для учета дифференциальной тропосферной и ионосферной задержки. Также автором предложен алгоритм учета дифференциального влияния ионосферной задержки с использованием двухчастотных фазовых ГНСС измерений, полученных приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты. В предложенном алгоритме используется уравнение первых разностей фазовых ГНСС псевдодальностей.

Адаптированы алгоритмы медианного среднего и адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа к разработанной методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ФАЗОВЫХ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ ПО ЭФЕМЕРИДАМ СПУТНИКОВ И КООРДИНАТАМ ПУНКТА НАБЛЮДЕНИЙ

3.1 Программное обеспечение методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений

Для реализации и проверки методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений автором был создан в среде Delphi 7 на языке Turbo Pascal программный комплекс Cycle slip, состоящий из отдельных модулей (подпрограмм):

- SlipCalc – модуль (основная подпрограмма) для обнаружения и редактирования аномальных значений, вызванных потерями счета циклов, в фазовых ГНСС измерениях;
- r2t – модуль для преобразования файла наблюдений в формате RINEX (версия 2.11) в текстовый файл (конвертор 1);
- posCalc – модуль для вычисления координат спутников ГЛОНАСС и GPS по навигационным данным и данным точных эфемерид (конвертор 2) [89];
- TropoCalc – модуль для вычисления тропосферных задержек с использованием простейших функций отображения (конвертор 3). На рисунке 3.1 показано диалоговое окно модуля TropoCalc;

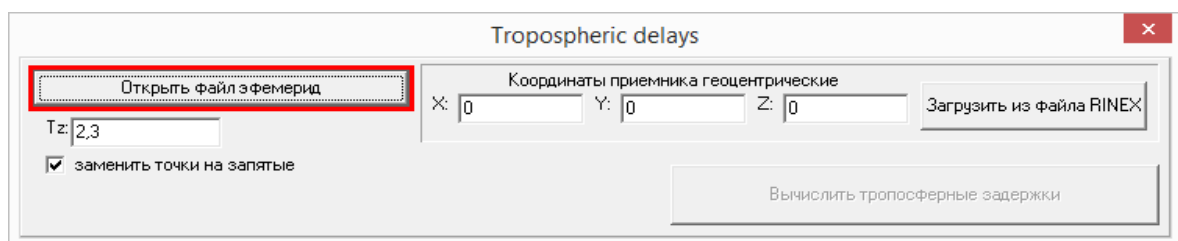


Рисунок 3.1 – Диалоговое окно модуля TropoCalc

– IonoCalc – модуль для вычисления ионосферных задержек с использованием модели IONEX и с использованием двухчастотных ГНСС данных (конвертор 4);

– DiffCalc – модуль для вычисления первых разностей между измеренными и смоделированными данными. На программу DiffCalc получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ (Приложение Г). На рисунке 3.2 показано диалоговое окно модуля DiffCalc [38];

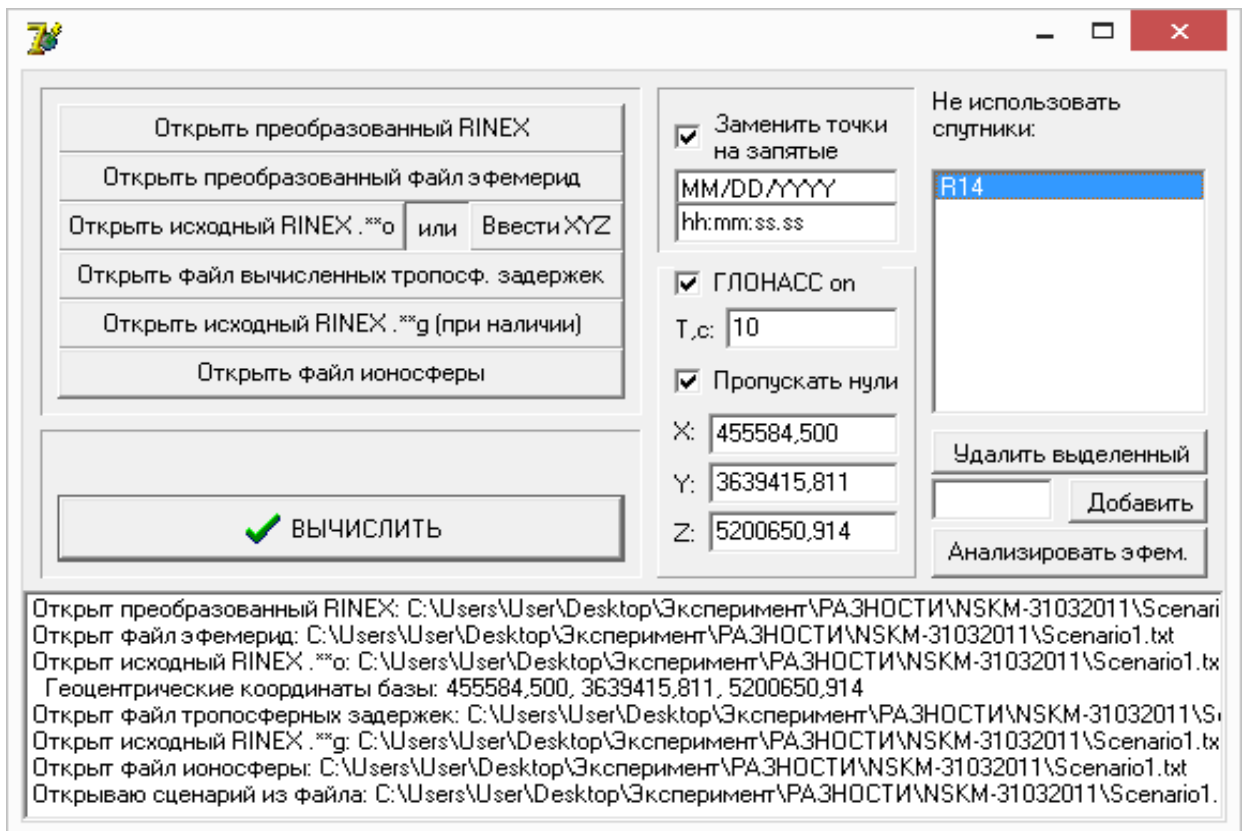


Рисунок 3.2 – Диалоговое окно программного модуля DiffCalc

– t2r – модуль для преобразования выходного текстового файла ПК в файл наблюдений в формате RINEX (версия 2.11).

В качестве дополнительных модулей использовались два модуля RTKGET и RTKPOST, входящие в программный комплекс RTKLib, разработанный учеными Токийского университета [124].

Модуль RTKGET позволяет получать исходные данные, представляемые Международной ГНСС службой. Модуль RTKPOST представляет собой программный комплекс для постобработки ГНСС данных.

На рисунке 3.3 представлено диалоговое окно программного модуля RTKGET версии 2.4.3.

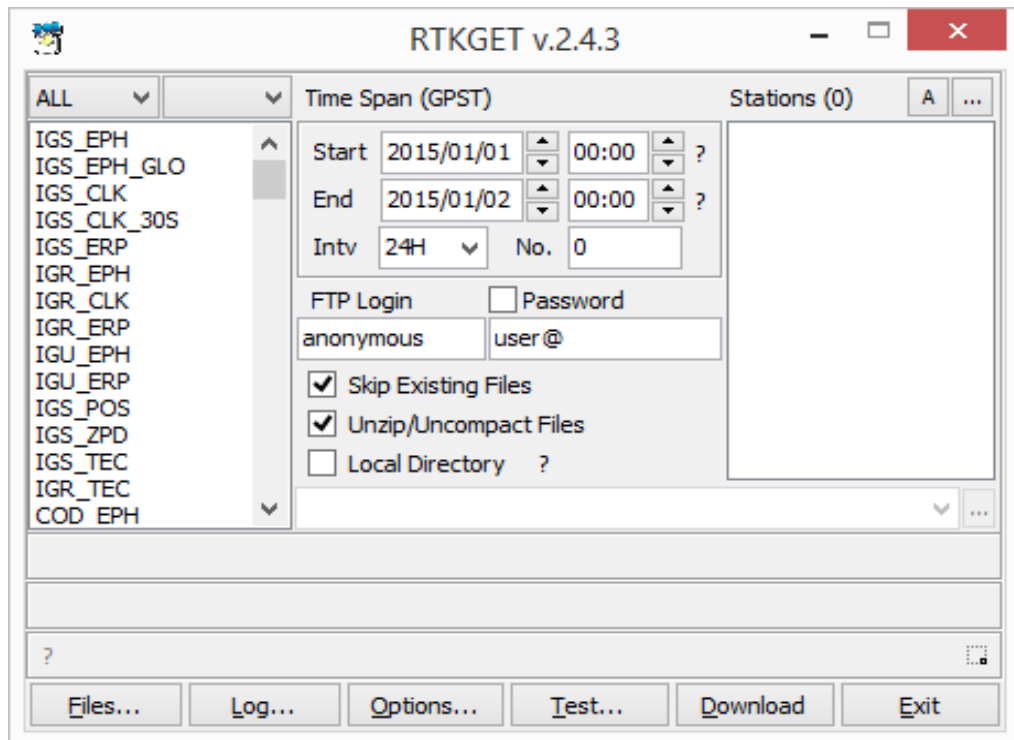


Рисунок 3.3 – Диалоговое окно программного модуля RTKGET версии 2.4.3

На рисунке 3.4 представлена структурная схема программного комплекса Cycle Slip.

Созданный программный комплекс Cycle Slip работает следующим образом.

Исходные данные в виде файла наблюдения (в формате RINEX версии 2.11), файлов эфемерид (в форматах *.n, *.g или *.sp3), файла ионосферы (в формате *.i или из двухчастотных данных) преобразуются с помощью конверторов 1–4.

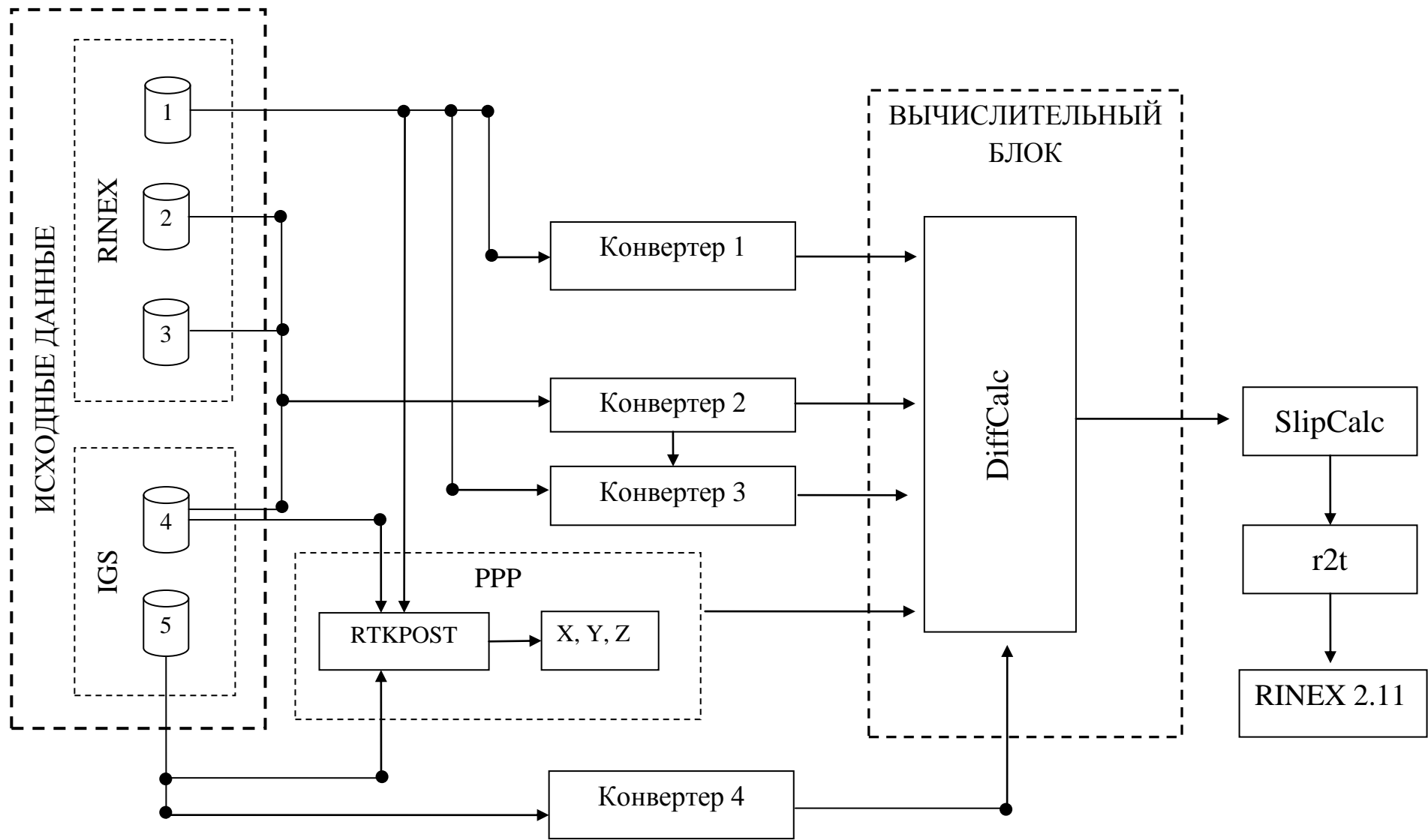


Рисунок 3.4 – Структурная схема программного комплекса Cycle Slip

В результате образуются четыре выходных файла в формате (*.txt): файл наблюдений, файл с координатами спутников ГНСС, вычисленными по бортовым или точным эфемеридам, файлы рассчитанных тропосферных и ионосферных задержек (в линейной мере).

Программный комплекс Cycle Slip может работать как с приближенными, так и с точными координатами приемника. Приближенные координаты приемника содержатся в заголовке файла RINEX. Точные координаты рассчитываются с помощью метода PPP (точного точечного позиционирования) в программном модуле RTKPOST или вводятся вручную. В приложении Д приведена пошаговая инструкция для вычисления координат пункта наблюдения методом PPP в ПО RTKPOST.

Подготовленные таким образом выходные файлы поступают в программный модуль DiffCalc, в котором происходит вычисление первых разностей между измеренными и смоделированными фазовыми ГНСС измерениями, полученными геодезическим приемником, подключенным к высокоточному атомному стандарту частоты.

Полученные после вычисления остаточные разности между измеренными и смоделированными первыми разностями фазовых ГНСС измерений далее анализируются и исправляются в соответствии с алгоритмами, описанными в 2.4 и реализованными в модуле SlipCalc. В результате на выходе имеется свободный от потерь счета циклов файл наблюдений в формате *.txt, максимально близкий к исходным измерениям. Этот файл преобразуется в формат RINEX версии 2.11 конвертором t2r.

Для проверки правильности работы созданного программного комплекса Cycle Slip использовалась измерительная информация, полученная во время выполнения проекта Российского научного фонда «Разработка фундаментальной теории, методов и алгоритмов координатно-временного и навигационного обеспечения для решения приоритетных государственных задач геодезии и дистанционного зондирования с учетом классических и релятивистских эффектов

гравитационного поля Земли и других массивных тел солнечной системы», в виде 6-чого файла наблюдения. Измерения выполнялись двухчастотным приемником JAVAD Sigma G3T с дискретностью 1 с. Приемник был подключен к высокостабильному атомному стандарту частоты и времени Ч1-1006 [44].

Полученный в ходе экспериментов файл наблюдений был предварительно обработан в программном комплексе OSTAВА_PPA, разработанном Харьковской научно-исследовательской группой [45]. Цель этой обработки заключалась в устранении возможных потерь счета циклов, а также ошибок, вызванных многолучевостью [45]. Результаты предварительной обработки приведены в приложении Е.

В итоге был получен «эталонный» файл наблюдений, в котором гарантированно отсутствуют указанные погрешности. На рисунках 3.5 и 3.6 приведена оценка погрешностей фазовых измерений, обработанных по программе OSTAВА_PPA на частотах L1 и L2 по каждому наблюдаемому спутнику системы GPS.

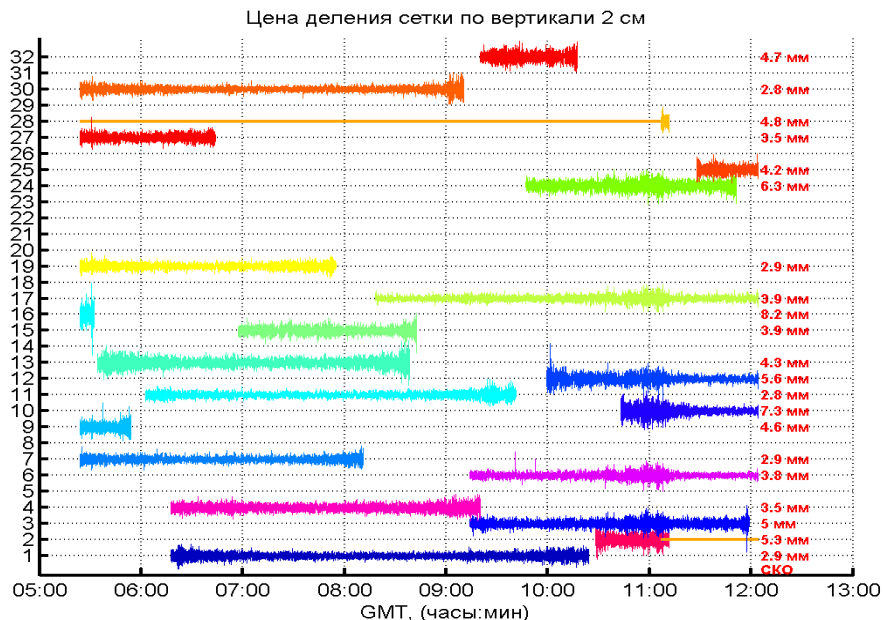


Рисунок 3.5 – Оценка погрешностей обработанных фазовых измерений на частоте L1 по каждому наблюдаемому спутнику системы GPS

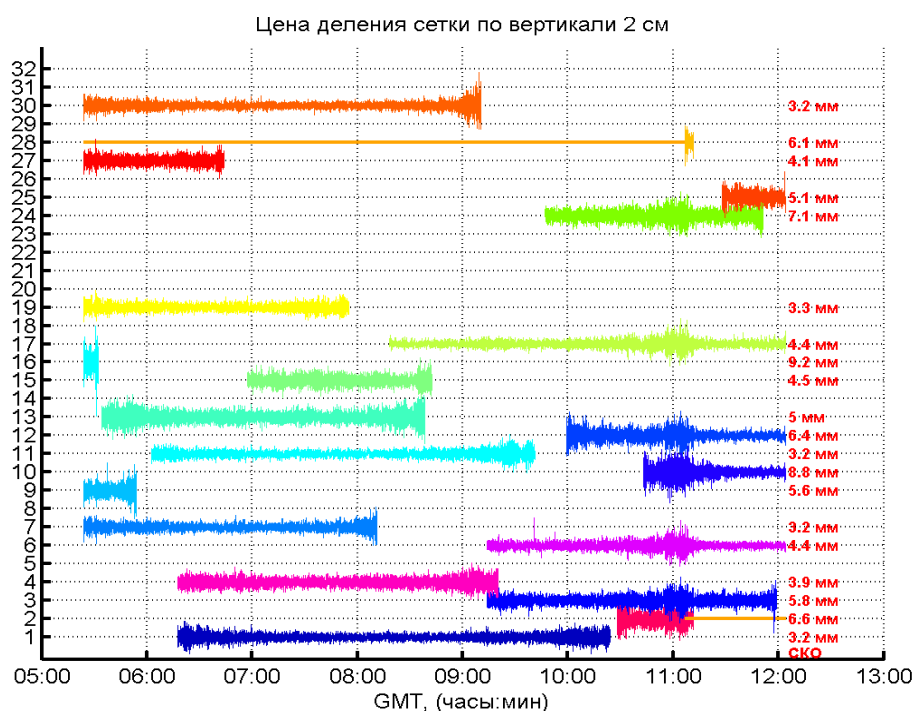


Рисунок 3.6 – Оценка погрешностей обработанных фазовых измерений на частоте L2 по каждому наблюдаемому спутнику системы GPS

Графики на рисунках 3.5, 3.6 показывают, что в фазовых измерениях отсутствуют потери счета циклов, а шум измерений не превосходит ± 2 см.

Затем полученный «эталонный» RINEX файл был обработан с помощью программного комплекса Cycle slip.

Обработка данных проводилась при следующих входных данных:

а) использовались точные эфемериды спутников ГЛОНАСС и GPS, а также глобальная модель ионосферы, взятые с сайта Международной ГНСС службы;

б) координаты пункта наблюдения определялись методом точного точечного позиционирования (PPP) в программном продукте RTKPOST;

в) значение тропосферной задержки оценивалось с использованием модели с простейшей функцией отображения [80, 83].

На рисунке 3.7 приведены «эталонные» разности между измеренными и смоделированными данными для частоты L1.

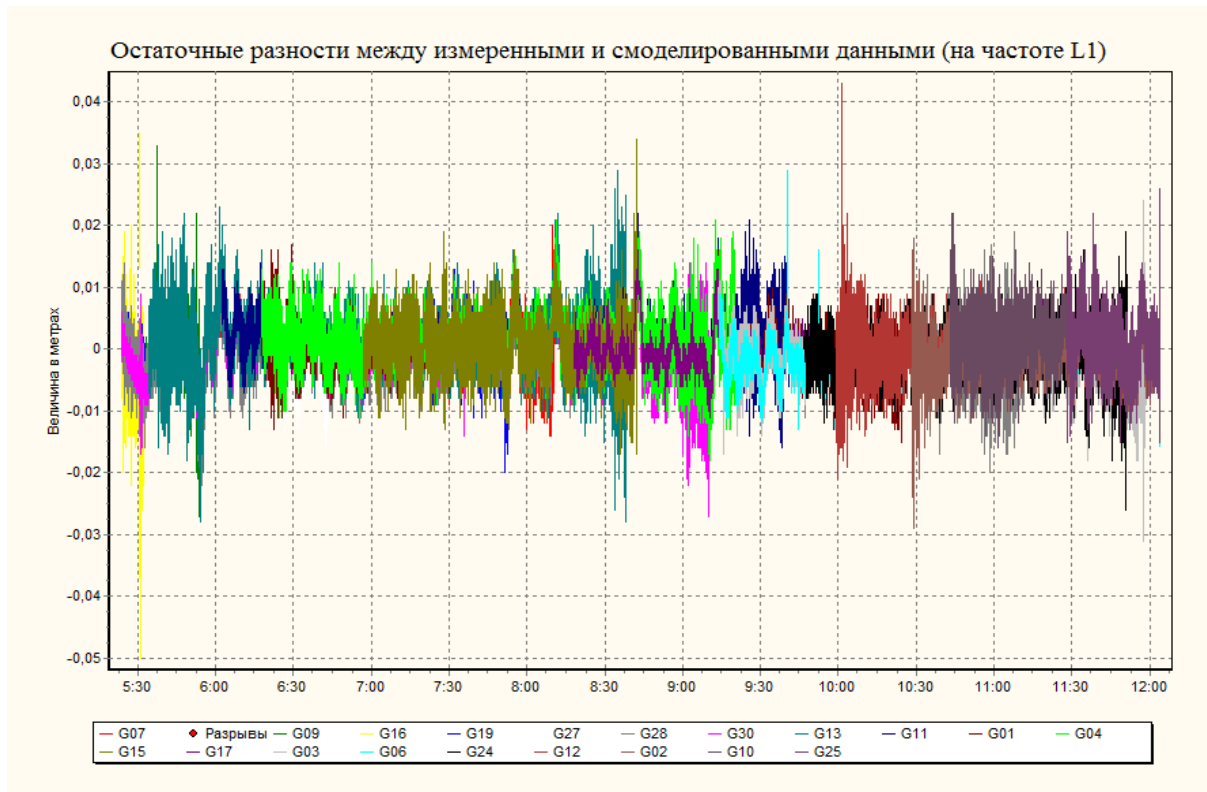


Рисунок 3.7 – «Эталонные» разности между измеренными и смоделированными данными для частоты L1

Из рисунка 3.7 видно, что программный комплекс Cycle slip подтверждает отсутствие потерь счета циклов и аномальных погрешностей в «эталонном» RINEX файле, полученном в результате обработки в ПО OSTAВА_PPA. Это говорит о том, что разработанный программный комплекс Cycle slip может быть использован для детальной проверки методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений.

После этого автором были проведены исследования методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений с использованием разработанного программного комплекса Cycle slip. В 3.2 продемонстрированы возможности скользящего среднего для выявления потерь счета циклов на данных, полученных на станции MDVJ (поселок Менделеево, Московская область). В 3.3 на примере имитационных данных («эталонном» RINEX файле) показаны результаты по обнаружению и исправлению потерь счета циклов с использованием адаптивной рекуррентной

процедуры калмановского типа. В 3.4 на реальных ГНСС измерениях показана работа программного комплекса Cycle slip по исправлению обнаруженных потерь счета циклов. Также доказано, что разработанный программный комплекс не искажает исходные измерения, но, удаляя аномальные погрешности, приводит к повышению точности результатов измерений по внутренней сходимости.

В 3.5 приведены результаты исследования по оценке дифференциальной кодовой многолучевости с использованием разработанных в диссертационной работе алгоритмов, там же подтверждена возникающая ионосферная дивергенция между кодовыми и фазовыми ГНСС псевдодальностями. В этих исследованиях использовались данные, полученные на станции IRKJ (город Иркутск).

3.2 Имитационное моделирование с использованием скользящего среднего

Для проверки правильности работы алгоритма скользящего среднего в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений использовалась измерительная информация, полученная со станции MDVJ (поселок Менделеево, Московская область) Международной ГНСС службы от 1 января 2013 года. Станция оснащена двухчастотным, двухсистемным приемником Topcon NetG3. Приемник подключен к высокостабильному водородному генератору частоты. Дискретность регистрируемых данных составляла 30 с. Разница между приближенными координатами (приведенными в заголовке файла наблюдений RINEX) и полученными по методу PPP составила 2,5 м. Погрешность в координатах спутника, определенных по навигационным данным и оцененных по расхождению с точными эфемеридами, для системы GPS составляет 1,5 м, для системы ГЛОНАСС – 3 м [9].

Для имитационного моделирования с использованием скользящего среднего из суточного файла были выбраны часовые отрезки для четырех спутников (по два для каждой системы): G1, G13, R1, R19 с различным расположением видимых траекторий относительно горизонта (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Характеристики траекторий выбранных спутников

ГНСС	Спутник	Время UT		Угол возвышения	
		$t_{нач.}$	$t_{кон.}$	$h_{нач.}$	$h_{кон.}$
GPS	G1	$22^{h}52^{m}$	$23^{h}46^{m}$	17°	7°
GPS	G13	$15^{h}00^{m}$	$16^{h}00^{m}$	52°	82°
ГЛОНАСС	R1	$7^{h}00^{m}$	$8^{h}00^{m}$	15°	48°
ГЛОНАСС	R19	$0^{h}00,5^{m}$	$0^{h}55,5^{m}$	68°	40°

В вычислении сглаженных значений невязок использовалось скользящее среднее с размером окна равным 5.

На рисунках 3.8 и 3.9 показан пример работы фильтра со спутниками системы ГЛОНАСС и GPS. Стандартное отклонение σ_i оценивалось по формуле Бесселя (2.68).

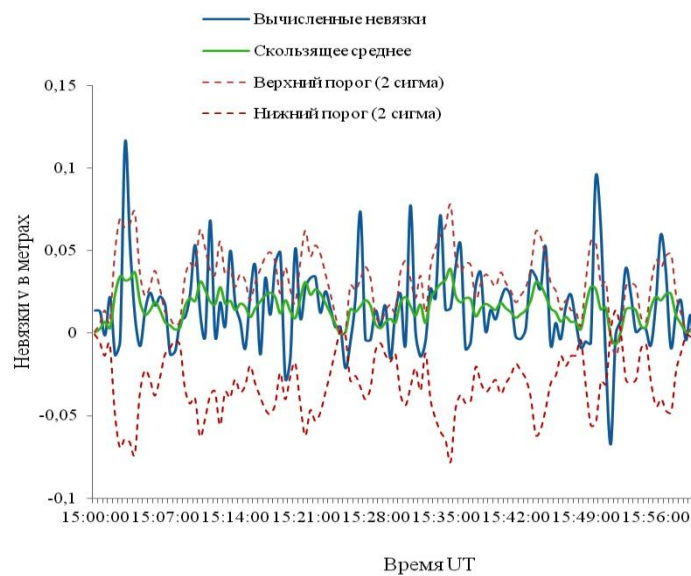


Рисунок 3.8 – Остаточные невязки спутника G13 системы GPS

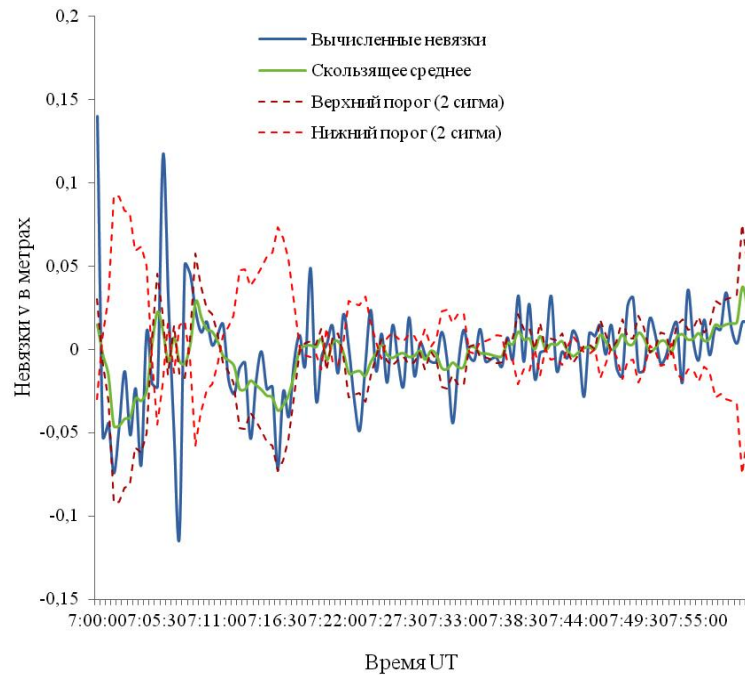


Рисунок 3.9 – Остаточные невязки спутника R1 системы ГЛОНАСС

На рисунке 3.8 видно, что 10 значений остаточных разностей превышают заданный критерий $\pm 2\sigma$, а на рисунке 3.9 – 17 значений. Это говорит о том, что в данных значениях присутствуют аномальные погрешности, которые могут быть обнаружены с использованием скользящего среднего. В дальнейшем эти аномальные погрешности исправляются с помощью методики контроля фазовых ГНСС измерений с использованием эфемерид спутников и координат пункта наблюдений.

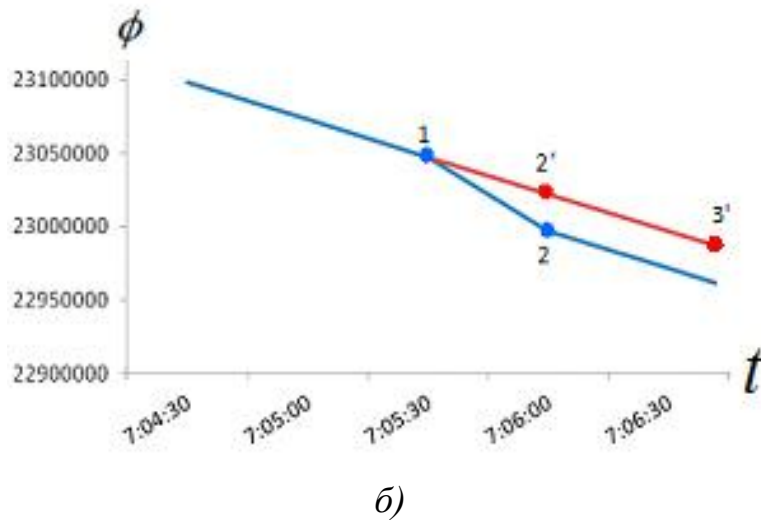
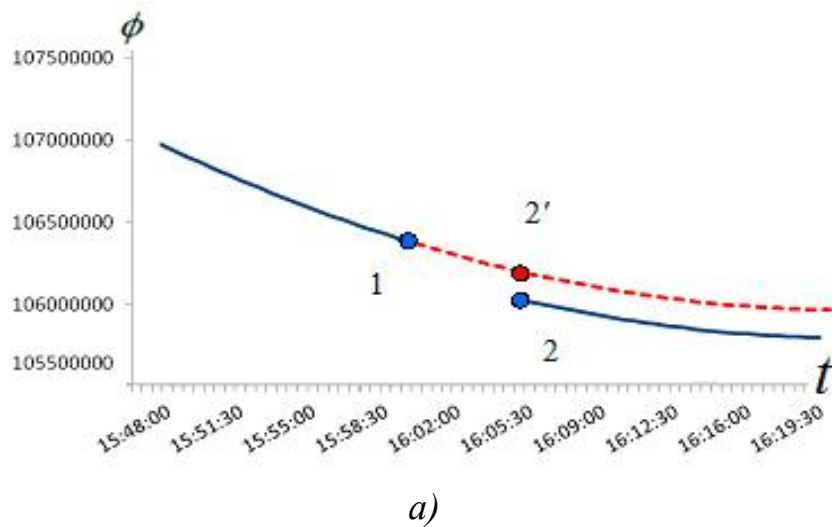
На следующем шаге была проверена работа фильтра, основанного на скользящем среднем, по выявлению и устранению неявных и явных потерь счета циклов. Явная потеря счета цикла была смоделирована в файле наблюдения спутника системы GPS G13. Для этого в файле введен разрыв продолжительностью 5 мин, а затем введен скачок на величину ΔN

$$\Delta N = \text{int}[(P_{\text{кон}} - P_{\text{нач}}) / \lambda], \quad (3.1)$$

где $P_{кон}$ и $P_{нач}$ – значения P-кодовых псевдодальностей соответственно в конце и в начале разрыва (рисунок 3.10, а);

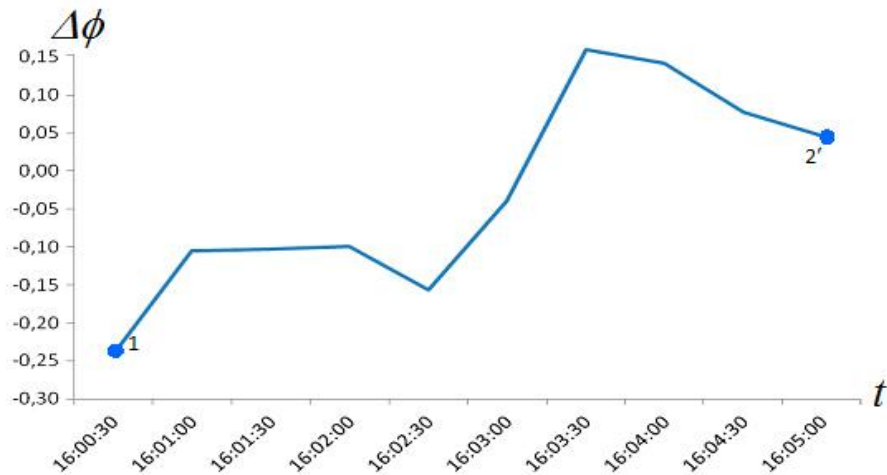
int – оператор выделения целой части числа.

Для моделирования неявной потери счета циклов был отобран спутник R1 системы ГЛОНАСС, моделирование производилось аналогичным образом, только $P_{кон}$ и $P_{нач}$ были выбраны соседними (рисунок 3.10, б).

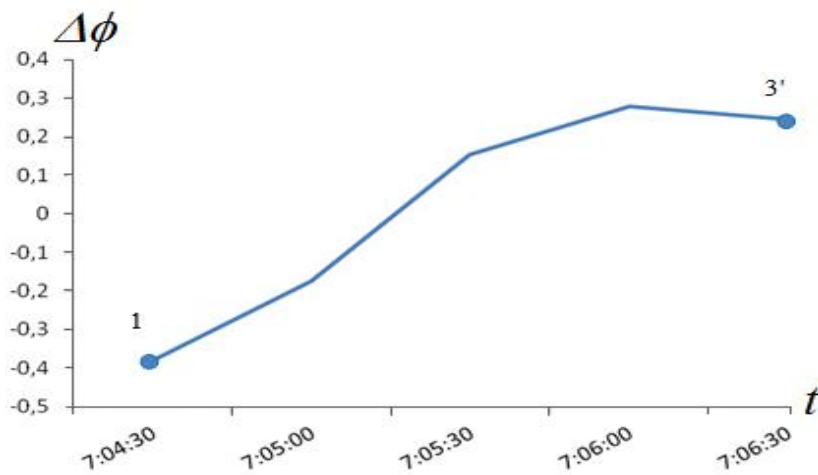


1 – точка начала разрыва в измерениях, 2 – точка возобновления измерений. Синим цветом показаны исходные данные для фильтрации, красным цветом – восстановленные данные
 Рисунок 3.10 – Моделирование явной и неявной потери счета циклов в фазе несущей: а) для спутника GPS G13, б) для спутника ГЛОНАСС R1

После этого данные были восстановлены с применением формулы (2.71). Для учета ионосферной задержки использовались кодовые псевдодальности (для системы GPS использовались точные коды, а для системы ГЛОНАСС – коды стандартной точности). Расхождения $\Delta\phi$ между восстановленными и исходными данными фазы несущей показаны на рисунке 3.11.



a)



б)

Рисунок 3.11 – Расхождения между реально измеренными и смоделированными фазами несущей (в циклах): а) для спутника GPS G13; б) для спутника ГЛОНАСС R1

Из анализа рисунков 3.8–3.11 можно сделать следующий вывод, что применение фильтра скользящего среднего позволяет выполнить надежный и качественный контроль и восстанавливать данные измерений, полученные как спутниками GPS, так и спутниками ГЛОНАСС. Несколько более грубые результаты, полученные по спутнику ГЛОНАСС, объясняются недоступностью кодов повышенной точности для этой системы. Разработанная методика контроля фазовых ГНСС измерений с применением скользящего среднего позволяет выявлять и исключать погрешности, превышающие величину равную 10 см, то есть половину длины несущей волны, даже с использованием стандартного кода ГЛОНАСС.

3.3 Имитационное моделирование с использованием адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа

Процедура проверки методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам и координатам пункта наблюдений с использованием адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа включала в себя исследование явных и неявных потерь счетов циклов, которые имитировались случайным образом.

Неявные потери счета циклов вводились тремя разными способами в исходный (дискретность 1 с) и прореженные файлы. Прореженные файлы были получены из «эталонного» RINEX файла с дискретностью 5; 10; 15; 30 с.

В первом способе в исходный и прореженные файлы вводились случайным образом одиночные потери счета циклов (величиной в 1 цикл) и с использованием методики контроля фазовых ГНСС измерений определялось количество обнаруженных потерь счета циклов.

Во втором способе в исходный и прореженные файлы вводились потери счета циклов (величиной в 1 цикл) в заданный интервал наблюдений и с использованием методики контроля фазовых ГНСС измерений определялось количество обнаруженных потерь счета циклов.

В третьем способе в указанные файлы вводился случайным образом белый шум с амплитудой менее 1 цикла в заданный интервал наблюдений, и с использованием адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа выполнялось сглаживание смоделированных измерений.

Явные потери счета циклов имитировались в виде разрыва в данных (с длительностью до 10 мин) и с использованием адаптивной рекуррентной процедуры выполнялось его восстановление.

Для проверки методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам и координатам пункта наблюдений с использованием адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа была написана программа «Changer» в среде Delphi 7 на языке Turbo Pascal, позволяющая вносить в «эталонный» и прореженные файлы заранее определенные погрешности случайного характера. Диалоговое окно программы представлено на рисунке 3.12.

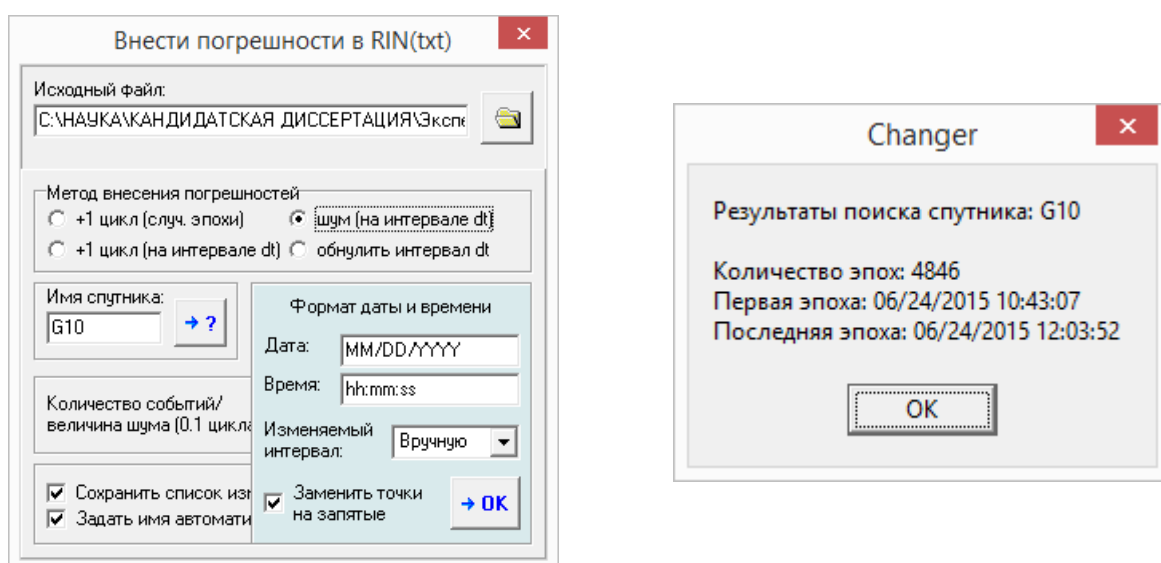


Рисунок 3.12 – Диалоговое окно программы «Changer»

В таблицах 3.2 и 3.3 показаны результаты обнаружения одиночных потерь счета циклов (величиной 1 цикл).

Таблица 3.2 – Результаты обнаружения одиночных потерь счета циклов, введенные случайным образом в «эталонный» и прореженные файлы

Дискретность наблюдений	Количество введенных случайным образом одиночных потерь счета циклов		Процент обнаруженных одиночных потерь счета циклов			
			с использованием адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа		с использованием алгоритма скользящего среднего	
	Всего	В наблюдения отдельного спутника				
1 с	700	G07 – 200	100 %	100 %	100 %	100 %
		G01 – 500		100 %		100 %
5 с	400	G24 – 200	100 %	100 %	99 %	99 %
		G28 – 200		100 %		99 %
10 с	200	G24 – 100	100 %	100 %	99 %	98 %
		G28 – 100		100 %		99 %
15 с	200	G07 – 50	99 %	99 %	98 %	100 %
		G15 – 50		99 %		95 %
		G28 – 100		100 %		98 %
30 с	100	G07 – 30	99 %	99 %	100 %	100 %
		G15 – 30		100 %		100 %
		G30 – 40		98 %		100 %

Таблица 3.3 – Результаты обнаружения одиночных потерь счета циклов, введенные в заданный интервал наблюдений в «эталонный» файл

Дискретность наблюдений	Количество введенных одиночных потерь счета циклов в заданный интервал наблюдений	Процент обнаруженных одиночных потерь счета циклов
1 с	G07 – 30 (30 с)	100 %
1 с	G07 – 60 (60 с)	100 %
1 с	G07 – 300 (5 мин)	100 %
1 с	G07 – 600 (10 мин)	99 %

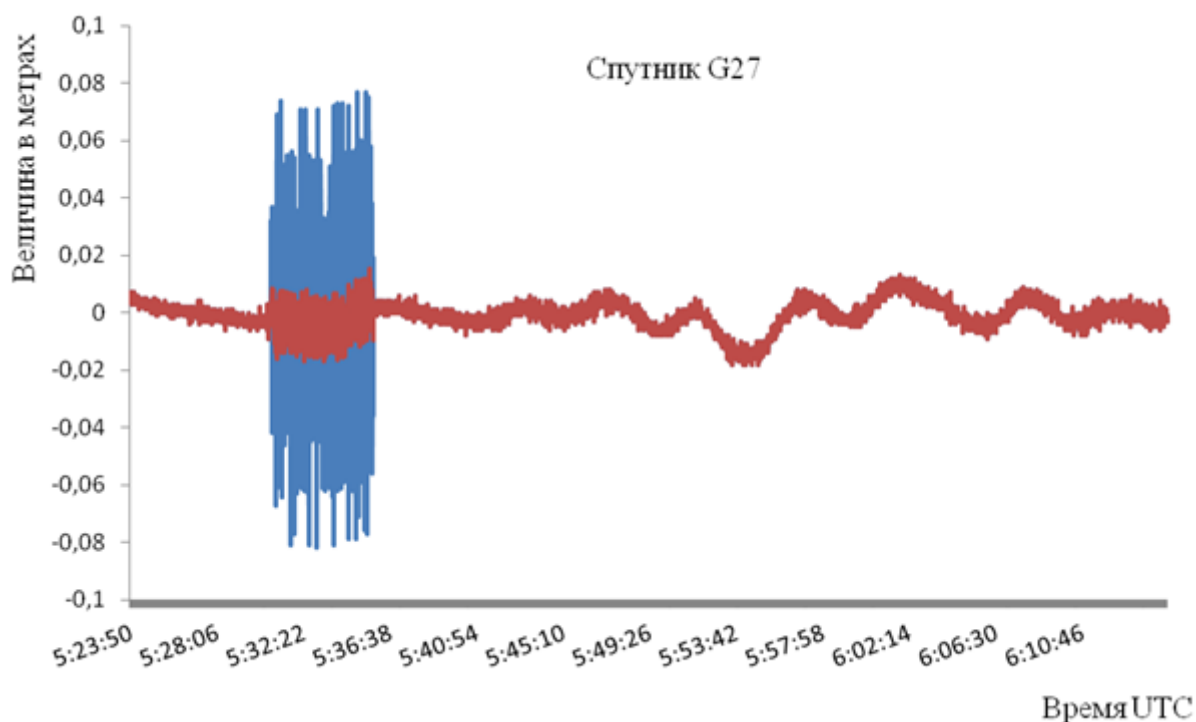
Из таблицы 3.2 видно, что использование в методике контроля фазовых ГНСС измерений, как алгоритма скользящего среднего, так и адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа дает почти одинаковые результаты по обнаружению одиночных потерь счета циклов (с величиной 1 цикл). При этом процент обнаруженных одиночных потерь счетов циклов практически

сохраняется при изменении дискретности наблюдений. Из этого можно сделать следующий вывод: процесс обнаружения потерь счетов циклов с использованием методики контроля фазовых ГНСС измерений практически не зависит от дискретности наблюдений, если дискретность наблюдений не превышает 30 с. Дискретность 30 с является максимальной дискретностью, принятой Международной ГНСС службой [94].

Из таблицы 3.3 видно, что алгоритм адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа позволяет выявлять почти со 100 процентной вероятностью одиночные потери счета (с величиной 1 цикл) на интервале времени до 10 мин.

На рисунке 3.13 показана работа адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа по сглаживанию данных, когда в заданный интервал наблюдений вводился случайным образом белый шум. В данном примере автором задавался интервал наблюдений равный 5 мин, величина вносимого белого шума носит случайный характер, не превышающий 0,5 цикла (полдлины волны), а на рисунке 3.14 – по восстановлению данных. Интервал разрыва составлял 10 мин. Для корректной работы адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа образовавшийся разрыв был вначале восстановлен с использованием приращений геометрических дальностей.

Из рисунка 3.13 видно, что применение адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа позволяет корректно сглаживать зашумленные данные. Так на интервале наблюдений равного 5 мин величина вносимого белого шума случайного процесса уменьшилась с 0,5 цикла (полдлины волны) до 0,1 цикла, то есть ± 2 см.

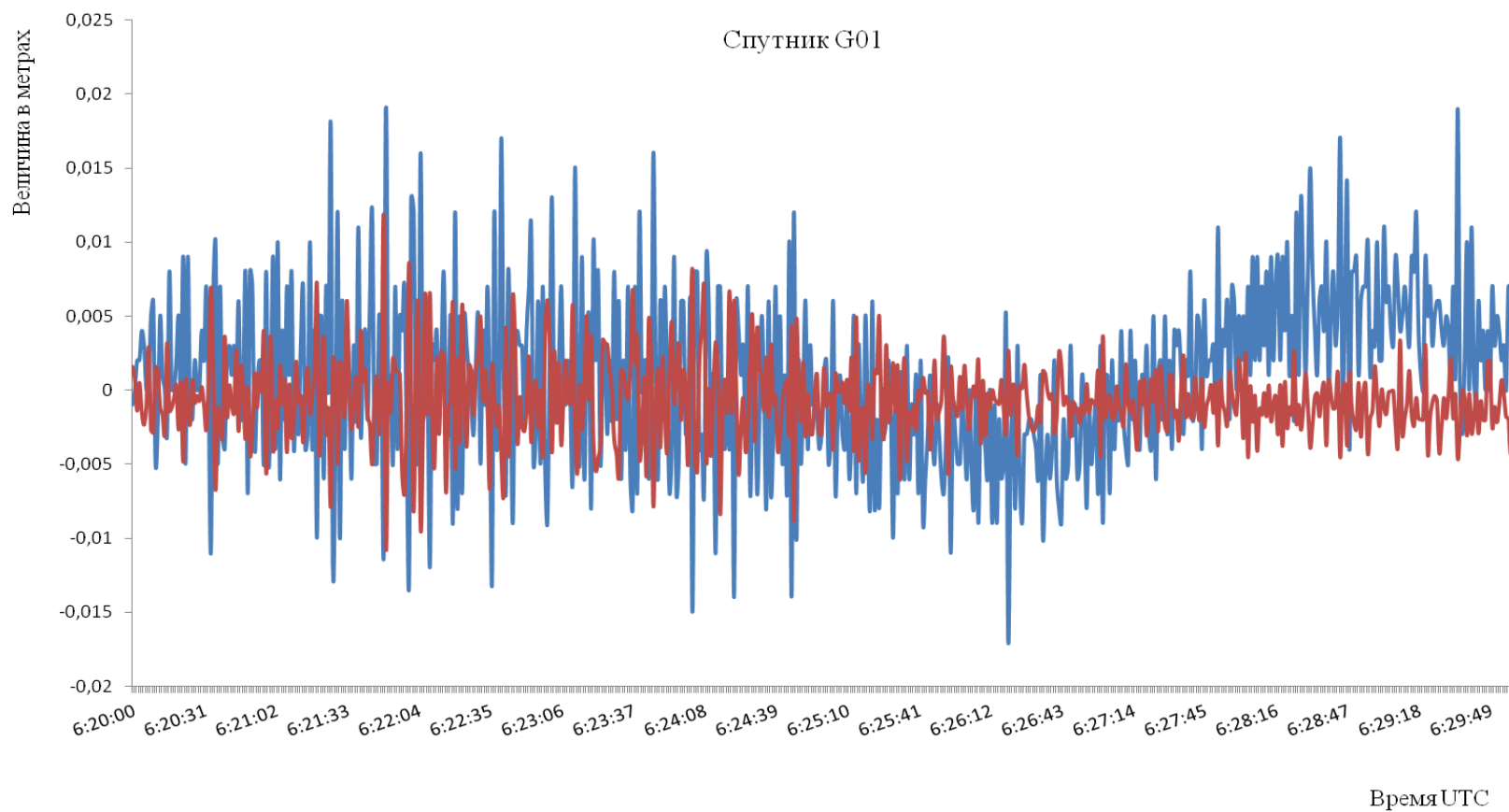


Синим цветом показаны зашумленные данные на частоте L1, а красным цветом – сглаженные данные, полученные с использованием адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа

Рисунок 3.13 – График остаточных невязок

Из рисунков 3.14 видно, что применение адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа позволяет корректно восстанавливать данные на интервале разрыва до 10 мин. При этом восстановленные данные будут иметь погрешности на уровне ± 2 см.

Таким образом, исходя из анализа таблиц 3.2. и 3.3. и рисунков 3.13 и 3.14, разработанную адаптивную рекуррентную процедуру калмановского типа можно считать универсальным фильтром для обнаружения и корректного исправления аномальных погрешностей и потерь счета циклов.



Синим цветом показаны исходные данные на частоте L1, а красным цветом – восстановленные данные, полученные с использованием адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа

Рисунок 3.14 – График остаточных невязок

3.4 Проверка правильности работы методики и программного обеспечения по реальным данным

Для проверки правильности работы методики и программного обеспечения по реальным данным использовались измерения, полученные в ходе выполнения двух научно-исследовательских проектов: «Анализ точностных характеристик ИТНП БИС 14Ц161 на этапе подготовки к проведению комплексных испытаний и МВИ сети 14Ц160» и «Разработка фундаментальной теории, методов и алгоритмов координатно-временного и навигационного обеспечения для решения приоритетных государственных задач геодезии и дистанционного зондирования с учетом классических и релятивистских эффектов гравитационного поля Земли и других массивных тел солнечной системы». Первый проект выполнялся сотрудниками Сибирского научно-исследовательского института метрологии совместно с сотрудниками Сибирской государственной геодезической академии в 2011 году. Заказчиком работ выступало Открытое акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (ОАО «ИСС»). Второй проект выполняется сотрудниками Сибирского государственного университета геосистем и технологий в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ).

В таблице 3.4 и 3.5 приведены основные сведения о ГНСС измерениях.

Таблица 3.4 – Основные сведения о ГНСС измерениях

Наименование пункта	Приближенные координаты пункта		Дата измерения	Продолжительность измерений	Дискретность наблюдений
	B	L			
NOVM	55°	82°	31.03.2011	1 сут	30 с
NSKM	54°	82°	31.03.2011	21 ч	10 с
NOVM	55°	82°	22.06.2015	1 сут	30 с
SHEB	51°	85°	24.06.2015	3 ч	1 с
SEMI	51°	85°	24.06.2015	2 ч	1 с
NOVM	55°	82°	31.03.2011	1 сут	30 с

Таблица 3.5 – Основные сведения о ГНСС измерениях

Наименование пункта	Тип используемого ГНСС оборудования	Тип используемой ГНСС антенны	Тип подключенного стандарта частоты
NOVM	JPS LEGACY	JPSREGANT_SD_E1	ВЭТ 1-19
NSKM	МПК-33	МПК-33	Ч1-1006
NOVM	JAVAD Sigma	GrAnt-G3T	ВЭТ 1-19
SHEB	JAVAD Sigma	GrAnt-G3T	Ч1-1006
SEMI	JAVAD Sigma	GrAnt-G3T	Ч1-1006

Полученные в ходе экспериментов измерения были обработаны с помощью программного комплекса Cycle slip.

Обработка в ПК Cycle slip состояла из двух этапов. На первом этапе анализировались остаточные разности между измеренными и смоделированными данными (результаты остаточных разностей приведены в Приложении Ж). В результате проведенного анализа из совокупности реальных ГНСС измерений выбирались данные, в которых присутствовало максимальное количество потерь счетов циклов. После этого на втором этапе в выбранном файле наблюдений, в котором присутствовало максимальное количество потерь счетов циклов, выполнялось исправление данных с помощью ПК Cycle slip. Затем в лицензионном ПО Topcon Tools была дважды выполнена обработка двух базовых линий (длиной 6 км и 30 км) с файлом, в котором присутствовало максимальное количество потерь счетов циклов, и с отредактированным файлом, полученным с помощью ПК Cycle slip. На основании сравнения полученных из обработки компонент векторов БЛ с их «эталонными» значениями выполнена проверка методики контроля фазовых ГНСС измерений с использованием эфемерид и координат пункта наблюдений на основе реальных данных.

Обработка измерений в ПК Cycle slip на первом этапе проводилась при следующих входных данных: использовались точные эфемериды спутников ГЛОНАСС и GPS, а также точная глобальная модель ионосферы, взятые с сайта Международной ГНСС службы, координаты пункта наблюдения определялись методом точного точечного позиционирования (PPP) в программном продукте

RTKPOST, значение тропосферной задержки оценивалось с использованием простейшей функции отображения.

В приложении Ж показаны остаточные разности между измеренными и смоделированными данными на пунктах NOVМ, NSKM, SHEB, SEMI по двум диапазонам частот L1 и L2.

Из анализа рисунков, представленных в Приложении Ж, можно сделать следующие выводы:

– аномальные значения (потери счета циклов) встречаются в данных на частоте L2 чаще, чем на частоте L1. Данное обстоятельство обусловлено тем, что мощность сигнала на частоте L1 выше, чем на частоте L2 [95–97];

– аномальные значения (потери счета циклов) в статических наблюдениях выражаются, в основном, в виде одиночных выбросов, которые превосходят генеральную совокупность данных. Обнаружение и исправление подобных выбросов легко может быть выполнено с помощью фильтра, основанного на скользящем среднем. Алгоритм обнаружения и исправления аномальных погрешностей приведен в 2.4;

– при наличии в данных большого количества аномальных значений – «пачек выбросов», которые видны на рисунках Ж.16 – Ж.17 приложения Ж, необходимо выполнять исправление с использованием адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа, описанной в 2.4;

– при создании спутниковых ГНСС сетей необходимо на этапе предварительной обработки исключать любые потери счета циклов, так как они будут вносить дополнительные погрешности в компоненты вектора базовой линии [58].

На втором этапа обработки в ПК Cycle Slip автором взят суточный файл наблюдений, полученный на пункте NOVМ 31 марта 2011 года, также для образования базовых линий использовались данные пунктов NSKW и NVSK на ту же дату.

Далее дважды выполнялась обработка базовых линий NVSK-NOVM и NSKW-NOVM с файлом наблюдений с пункта NOVM, в котором присутствуют потери счета циклов, и с тем же файлом, который прошел редактирование в ПК Cycle Slip. Затем сравнивались полученные из обработки компоненты БЛ с их «эталонными» значениями.

Процедура обработки БЛ проводилась в лицензионном программном продукте Topcon Tools версии 8.2. при следующих настройках: тип эфемерид – точные, обработка по двум частотам (L1 и L2), тип решения – fixed, угол отсечки по высоте – 10° , отслеживаемые системы – ГЛОНАСС и GPS.

В качестве «эталонных» значений выступали компоненты БЛ (dX, dY, dZ), полученные из обработки суточных сеансов наблюдений. Затем суточный файл наблюдений «разбивался» на часовые сеансы, которые так же обрабатывались.

В таблицах 3.6 и 3.7 приведены полученные из обработки компоненты и погрешности векторов базовых линий NSKW-NOVM и NVSK-NOVM, а на рисунках 3.15 и 3.16 приведены отклонения измеренных компонент векторов базовых линий NVSK-NOVM и NSKW-NOVM от их «эталонных» значений. В приведенных результатах обработки использовался файл наблюдений с пункта NOVM, в котором присутствуют потери счета циклов.

Из анализа рисунков 3.15 и 3.16 и на основании таблиц 3.6 и 3.7 можно сделать следующие выводы:

- при наличии «пачек выбросов» даже продолжительностью 10 минут наблюдаются изменения компонент вектора базовой линии NVSK-NOVM;
- для коротких базовых линий (длиной до 10 км) десятиминутные «пачки выбросов» не оказывают существенного влияния в процесс разрешения фазовых неоднозначностей в часовых файлах, так как для разрешения фазовых неоднозначностей при длине базовой линии до 10 км обычно достаточно 20 мин [83].

Таблица 3.6 – Компоненты вектора базовой линии NSKW-NOVM и их погрешности

(до редактирования в ПК Cycle Slip)

Продолжительность сеанса наблюдения	Компоненты вектора базовой линии, м			Длина БЛ, м	σdX , м	σdY , м	σdZ , м	RMS, м	Тип решения
	dX	dY	dZ						
с 31 марта по 1 апреля	3328,521	3535,708	-2793,793	5602,282	0,001	0,002	0,003	0,004	Fixed
с 0 ч до 1 ч 31 марта	3328,524	3535,703	-2793,798	5602,283	0,002	0,003	0,004	0,005	Fixed
с 1 ч до 2 ч 31 марта	3328,517	3535,688	-2793,809	5602,275	0,002	0,004	0,005	0,006	Fixed
с 2 ч до 3 ч 31 марта	3328,519	3535,698	-2793,790	5602,273	0,002	0,003	0,005	0,006	Fixed
с 3 ч до 4 ч 31 марта	3328,514	3535,695	-2793,797	5602,272	0,002	0,004	0,005	0,007	Fixed
с 4 ч до 5 ч 31 марта	В измерениях содержится получасовой разрыв								
с 5 ч до 6 ч 31 марта	3328,519	3535,708	-2793,795	5602,282	0,003	0,006	0,007	0,009	Fixed
с 6 ч до 7 ч 31 марта	3328,518	3535,692	-2793,794	5602,270	0,003	0,004	0,007	0,009	Fixed
с 7 ч до 8 ч 31 марта	3328,513	3535,696	-2793,798	5602,272	0,002	0,004	0,005	0,007	Fixed
с 8 ч до 9 ч 31 марта	3328,518	3535,704	-2793,795	5602,279	0,001	0,003	0,004	0,005	Fixed
с 9 ч до 10 ч 31 марта	3328,521	3535,713	-2793,787	5602,282	0,002	0,004	0,004	0,005	Fixed
с 10 ч до 11 ч 31 марта	3328,514	3535,688	-2793,811	5602,273	0,002	0,003	0,004	0,006	Fixed
с 11 ч до 12 ч 31 марта	3328,518	3535,692	-2793,808	5602,277	0,002	0,003	0,004	0,006	Fixed
с 12 ч до 13 ч 31 марта	3328,519	3535,693	-2793,805	5602,277	0,002	0,003	0,004	0,006	Fixed
с 13 ч до 14 ч 31 марта	3328,521	3535,693	-2793,811	5602,281	0,002	0,003	0,004	0,006	Fixed
с 14 ч до 15 ч 31 марта	3328,520	3535,692	-2793,809	5602,279	0,002	0,003	0,004	0,006	Fixed
с 15 ч до 16 ч 31 марта	3328,522	3535,706	-2793,799	5602,284	0,002	0,003	0,004	0,005	Fixed
с 16 ч до 17 ч 31 марта	3328,523	3535,712	-2793,790	5602,284	0,002	0,003	0,004	0,005	Fixed
с 17 ч до 18 ч 31 марта	3328,525	3535,701	-2793,798	5602,283	0,002	0,003	0,004	0,006	Fixed
с 18 ч до 19 ч 31 марта	3328,521	3535,695	-2793,812	5602,283	0,002	0,003	0,004	0,006	Fixed
с 19 ч до 20 ч 31 марта	3328,524	3535,718	-2793,782	5602,284	0,002	0,003	0,005	0,006	Fixed
с 20 ч до 21 часа 31 марта	3328,524	3535,716	-2793,785	5602,285	0,001	0,003	0,004	0,005	Fixed
с 21 часа до 22 ч 31 марта	3328,521	3535,693	-2793,810	5602,281	0,002	0,003	0,004	0,006	Fixed
с 22 ч до 23 ч 31 марта	3328,524	3535,694	-2793,812	5602,284	0,002	0,003	0,005	0,006	Fixed
с 23 ч 31 марта до 00 ч 1 апреля	3328,525	3535,706	-2793,798	5602,286	0,001	0,002	0,004	0,005	Fixed

Таблица 3.7 – Компоненты вектора базовой линии NVSK-NOVM и их погрешности

(до редактирования в ПК Cycle Slip)

Продолжительность сеанса наблюдения	Компоненты вектора базовой линии, м			Длина БЛ, м	σ_{dX} , м	σ_{dY} , м	σ_{dZ} , м	RMS, м	Тип решения
	dX	dY	dZ						
с 31 марта по 1 апреля	-18655,511	19681,072	-12166,522	29721,994	0,006	0,012	0,016	0,020	Fixed
с 0 ч до 1 ч 31 марта	-18655,511	19681,084	-12166,519	29722,001	0,008	0,015	0,015	0,021	Fixed
с 1 ч до 2 ч 31 марта	-18655,505	19681,064	-12166,534	29721,990	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 2 ч до 3 ч 31 марта	-18655,510	19681,078	-12166,525	29721,999	0,005	0,013	0,016	0,021	Fixed
с 3 ч до 4 ч 31 марта	-18655,492	19681,029	-12166,541	29721,962	0,016	0,020	0,020	0,033	<i>Float, Iono-Free</i>
с 4 ч до 5 ч 31 марта	В измерениях содержится получасовой разрыв								
с 5 ч до 6 ч 31 марта	-18655,508	19681,060	-12166,528	29721,987	0,007	0,013	0,016	0,022	Fixed
с 6 ч до 7 ч 31 марта	-18655,513	19681,093	-12166,508	29721,996	0,006	0,014	0,014	0,020	Fixed
с 7 ч до 8 ч 31 марта	-18655,514	19681,076	-12166,513	29721,995	0,007	0,013	0,016	0,022	Fixed
с 8 ч до 9 ч 31 марта	-18655,512	19681,057	-12166,542	29721,994	0,005	0,013	0,016	0,021	Fixed
с 9 ч до 10 ч 31 марта	-18655,512	19681,070	-12166,546	29722,003	0,006	0,015	0,016	0,022	Fixed
с 10 ч до 11 ч 31 марта	-18655,515	19681,060	-12166,543	29721,997	0,006	0,012	0,016	0,021	Fixed
с 11 ч до 12 ч 31 марта	-18655,507	19681,064	-12166,525	29721,987	0,006	0,014	0,014	0,020	Fixed
с 12 ч до 13 ч 31 марта	-18655,510	19681,078	-12166,536	29722,004	0,007	0,016	0,014	0,022	Fixed
с 13 ч до 14 ч 31 марта	-18655,510	19681,065	-12166,531	29721,992	0,005	0,012	0,016	0,021	Fixed
с 14 ч до 15 ч 31 марта	-18655,507	19681,063	-12166,531	29721,989	0,007	0,014	0,017	0,023	Fixed
с 15 ч до 16 ч 31 марта	-18655,509	19681,094	-12166,510	29722,003	0,008	0,015	0,014	0,022	Fixed
с 16 ч до 17 ч 31 марта	-18655,512	19681,070	-12166,546	29722,003	0,006	0,015	0,016	0,022	Fixed
с 17 ч до 18 ч 31 марта	-18655,510	19681,078	-12166,503	29721,989	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 18 ч до 19 ч 31 марта	-18655,511	19681,079	-12166,518	29721,989	0,007	0,014	0,017	0,023	Fixed
с 19 ч до 20 ч 31 марта	-18655,518	19681,090	-12166,496	29722,000	0,006	0,012	0,017	0,021	Fixed
с 20 ч до 21 часа 31 марта	-18655,516	19681,063	-12166,539	29721,999	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 21 часа до 22 ч 31 марта	-18655,514	19681,072	-12166,526	29721,998	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 22 ч до 23 ч 31 марта	-18655,507	19681,092	-12166,504	29721,998	0,008	0,014	0,014	0,021	Fixed
с 23 ч 31 марта до 00 ч 1 апреля	-18655,515	19681,064	-12166,538	29721,998	0,007	0,013	0,016	0,022	Fixed

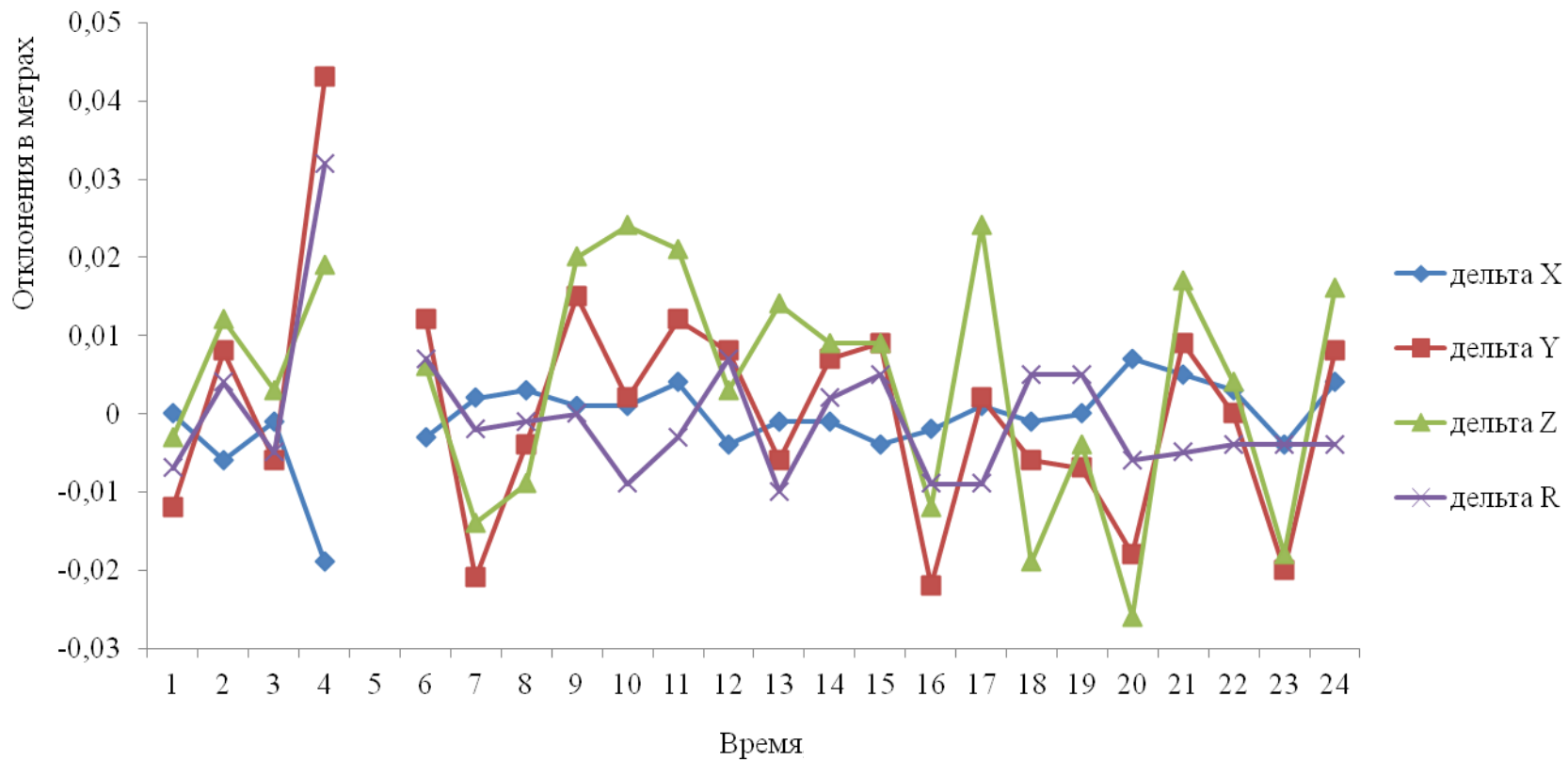


Рисунок 3.15 – Отклонения измеренных компонент вектора базовой линии NVSK-NOVM от их «эталонных» значений (до редактирования в ПК Cycle Slip)

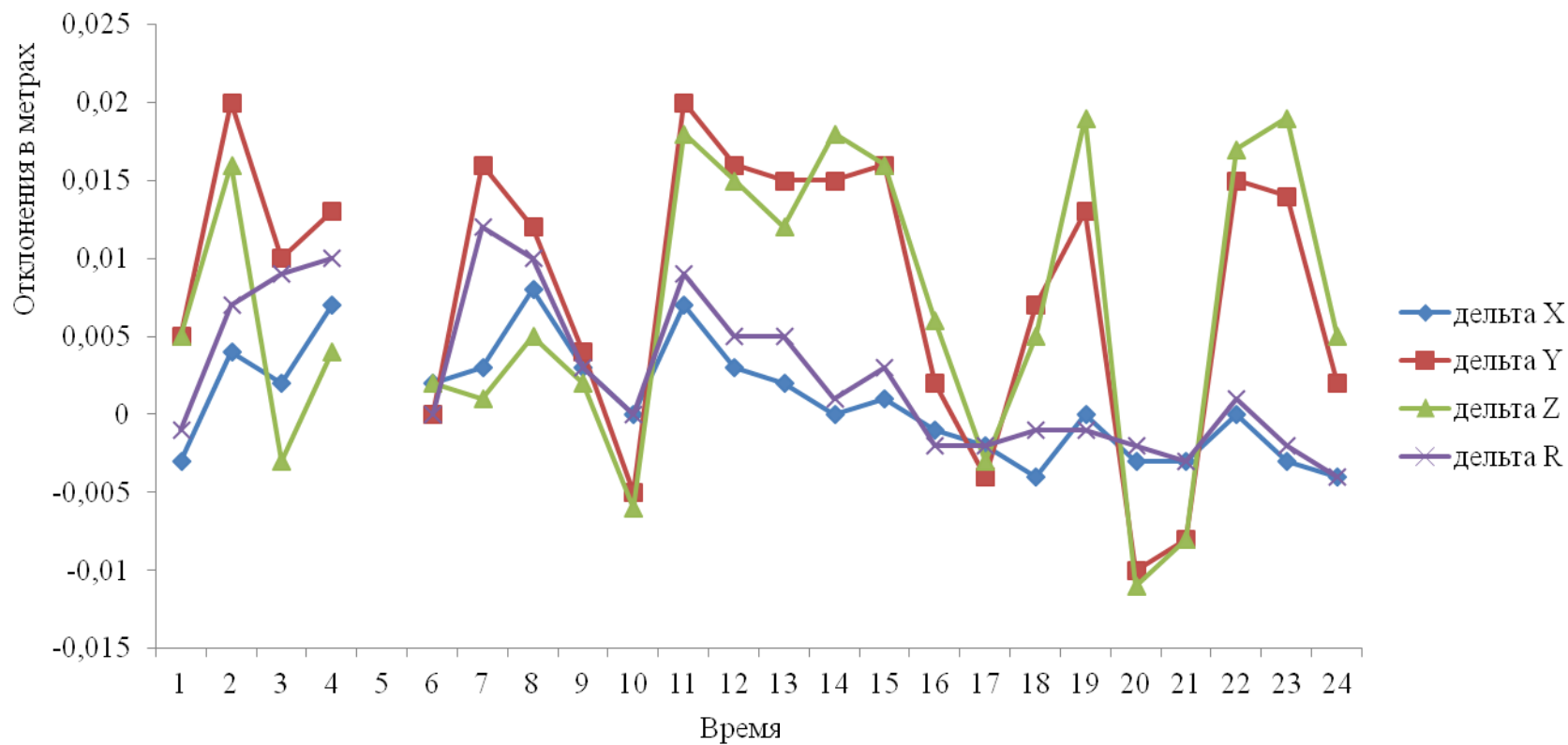


Рисунок 3.16 – Отклонения измеренных компонент вектора базовой линии NSKW-NOVM от их «эталонных» значений (до редактирования в ПК Cycle Slip)

Затем отредактированный файл наблюдений, полученный в ПК Cycle Slip, со станции NOVМ совместно с файлом наблюдений со станции NVSK был обработан в ПО Topcon Tools.

В таблице 3.8 приведены полученные из обработки компоненты и погрешности вектора БЛ NSKW-NOVM, а на рисунке 3.17 приведены отклонения измеренных компонент векторов базовых линий NSKW-NOVM от их «эталонных» значений.

Анализируя рисунок 3.17, и основываясь на данных, приведенных в таблице 3.8, можно сделать следующий вывод: разработанный ПК не искажает исходные данные, но при этом при появлении потерь счета циклов корректно их исправляет. Так для часового сеанса с 3 ч до 4 ч 31 марта 2011 года после редактирования в ПК Cycle Slip улучшились следующие статистические характеристики БЛ NVSK-NOVM: σ_dX с 16 мм до 6 мм, σ_dY с 20 мм до 12 мм, σ_dZ с 20 мм до 16 мм, а RMS с 33 мм до 21 мм. Это говорит о том, что разработанная методика контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений и ПК Cycle Slip ее реализующий позволяет повысить точность обработки результатов измерений по внутренней сходимости.

3.5 Применение методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений для исследования многолучевости и ионосферной дивергенции

В статьях [7, 8] автором выполнены исследования возможности применения разработанных в методике контроля фазовых ГНСС измерений алгоритмов для оценки дифференциальной кодовой многолучевости, а также для подтверждения возникающей ионосферной дивергенции между кодовыми и фазовыми псевдодальностями.

Таблица 3.8 – Компоненты вектора базовой линии NVSK-NOVM и их погрешности (после редактирования)

Продолжительность сеанса наблюдения	Компоненты вектора базовой линии, м			Длина БЛ, м	σdX , м	σdY , м	σdZ , м	RMS, м	Тип решения
	dX	dY	dZ						
с 31 марта по 1 апреля	-18655,511	19681,072	-12166,522	29721,994	0,006	0,012	0,016	0,020	Fixed
с 0 ч до 1 ч 31 марта	-18655,511	19681,084	-12166,519	29722,001	0,008	0,015	0,015	0,021	Fixed
с 1 ч до 2 ч 31 марта	-18655,505	19681,064	-12166,534	29721,990	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 2 ч до 3 ч 31 марта	-18655,510	19681,078	-12166,525	29721,999	0,005	0,013	0,016	0,021	Fixed
с 3 ч до 4 ч 31 марта	-18655,515	19681,060	-12166,543	29721,997	0,006	0,012	0,016	0,021	Fixed
с 4 ч до 5 ч 31 марта	В измерениях содержится получасовой разрыв								
с 5 ч до 6 ч 31 марта	-18655,508	19681,060	-12166,528	29721,987	0,007	0,013	0,016	0,022	Fixed
с 6 ч до 7 ч 31 марта	-18655,513	19681,093	-12166,508	29721,996	0,006	0,014	0,014	0,020	Fixed
с 7 ч до 8 ч 31 марта	-18655,514	19681,076	-12166,513	29721,995	0,007	0,013	0,016	0,022	Fixed
с 8 ч до 9 ч 31 марта	-18655,512	19681,057	-12166,542	29721,994	0,005	0,013	0,016	0,021	Fixed
с 9 ч до 10 ч 31 марта	-18655,512	19681,070	-12166,546	29722,003	0,006	0,015	0,016	0,022	Fixed
с 10 ч до 11 ч 31 марта	-18655,515	19681,060	-12166,543	29721,997	0,006	0,012	0,016	0,021	Fixed
с 11 ч до 12 ч 31 марта	-18655,507	19681,064	-12166,525	29721,987	0,006	0,014	0,014	0,020	Fixed
с 12 ч до 13 ч 31 марта	-18655,510	19681,078	-12166,536	29722,004	0,007	0,016	0,014	0,022	Fixed
с 13 ч до 14 ч 31 марта	-18655,510	19681,065	-12166,531	29721,992	0,005	0,012	0,016	0,021	Fixed
с 14 ч до 15 ч 31 марта	-18655,507	19681,063	-12166,531	29721,989	0,007	0,014	0,017	0,023	Fixed
с 15 ч до 16 ч 31 марта	-18655,509	19681,094	-12166,510	29722,003	0,008	0,015	0,014	0,022	Fixed
с 16 ч до 17 ч 31 марта	-18655,512	19681,070	-12166,546	29722,003	0,006	0,015	0,016	0,022	Fixed
с 17 ч до 18 ч 31 марта	-18655,510	19681,078	-12166,503	29721,989	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 18 ч до 19 ч 31 марта	-18655,511	19681,079	-12166,518	29721,989	0,007	0,014	0,017	0,023	Fixed
с 19 ч до 20 ч 31 марта	-18655,518	19681,090	-12166,496	29722,000	0,006	0,012	0,017	0,021	Fixed
с 20 ч до 21 часа 31 марта	-18655,516	19681,063	-12166,539	29721,999	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 21 часа до 22 ч 31 марта	-18655,514	19681,072	-12166,526	29721,998	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 22 ч до 23 ч 31 марта	-18655,507	19681,092	-12166,504	29721,998	0,008	0,014	0,014	0,021	Fixed
с 23 ч 31 марта до 00 ч 1 апреля	-18655,515	19681,064	-12166,538	29721,998	0,007	0,013	0,016	0,022	Fixed

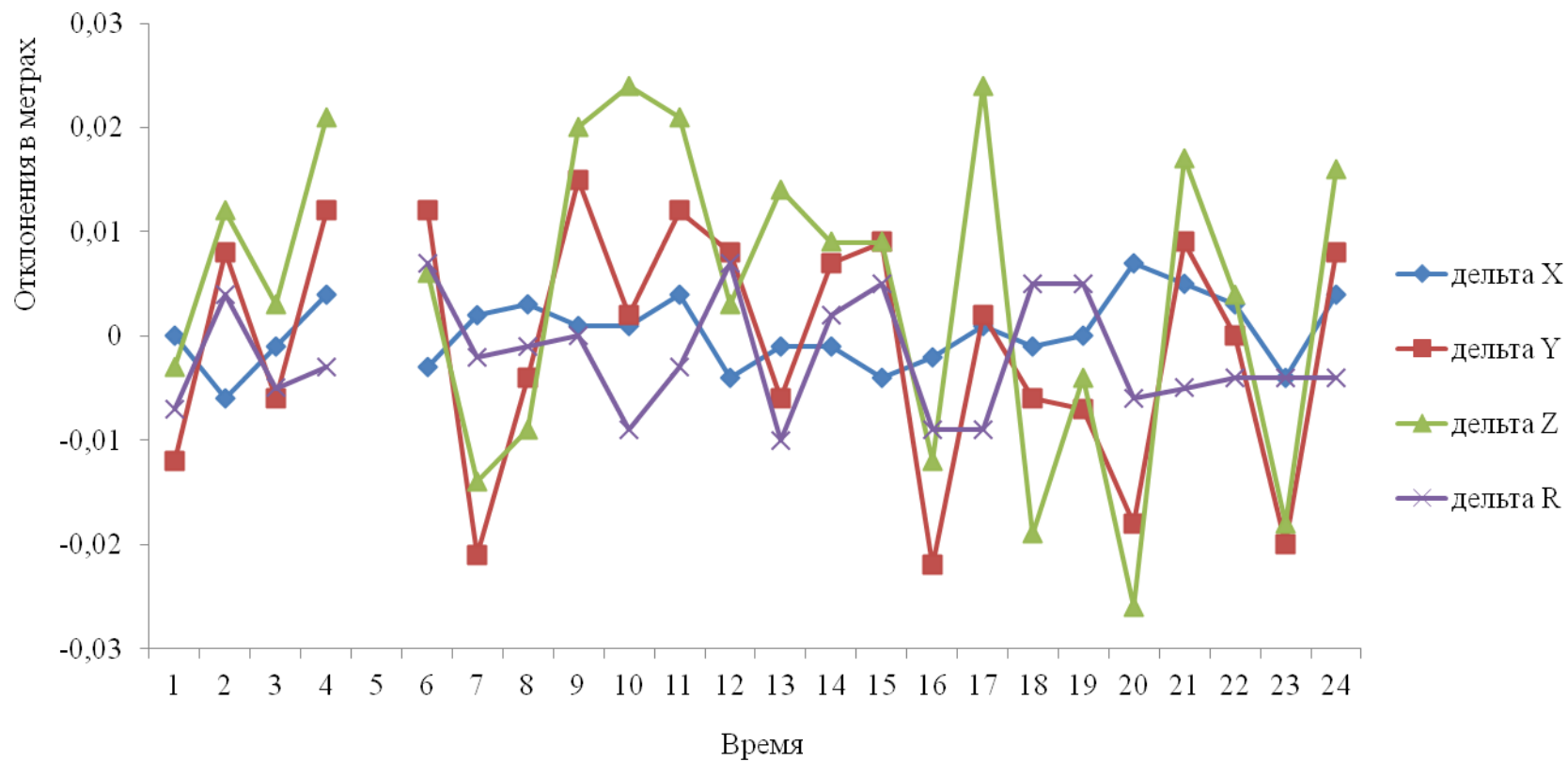


Рисунок 3.17 – Отклонения измеренных компонент вектора базовой линии NVSK-NOVM от их «эталонных» значений (после редактирования в ПК Cycle Slip)

Для оценки дифференциальной кодовой многолучевости воспользуемся формулами, описывающими первые разности кодовых и фазовых псевдодальностей, полученные ГНСС приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты.

Формулы первых разностей кодовых и фазовых псевдодальностей на частоте L1 имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta P_{rec}^{sat} (L1)_{i,i+1} = & (P_{rec}^{sat})_{i+1} - (P_{rec}^{sat})_i = (\Delta \rho_{rec}^{sat})_{i,i+1} + (\Delta I_{rec}^{sat})_{i,i+1} + \\ & + (\Delta T_{rec}^{sat})_{i,i+1} + (\Delta dm_{rec}^{sat})_{i,i+1} + ((A1_{rec})_{i,i+1} - (A1^{sat})_{i,i+1}) \cdot \Delta t + (v_{rec}^{sat})_{i,i+1}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_{rec}^{sat} (L1)_{i,i+1} = & (\Phi_{rec}^{sat})_{i+1} - (\Phi_{rec}^{sat})_i = (\Delta \rho_{rec}^{sat})_{i,i+1} + (\Delta I_{rec}^{sat})_{i,i+1} + \\ & + (\Delta T_{rec}^{sat})_{i,i+1} + (\Delta \delta m_{rec}^{sat})_{i,i+1} + ((A1_{rec})_{i,i+1} - (A1^{sat})_{i,i+1}) \cdot \Delta t + \\ & + (\delta N_{rec}^{sat})_{i,i+1} + (v_{rec}^{sat})_{i,i+1}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где $(\Delta \rho_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – изменения в геометрической дальности,

$(\Delta I_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – изменения в ионосферной задержке, выраженные в линейной мере,

$(\Delta T_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – изменения в тропосферной задержке, выраженные в линейной мере,

$(\Delta dm_{rec}^{sat})_{i,i+1}$, $(\Delta \delta m_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – изменение влияния многолучевости на кодовые и фазовые измерения, соответственно,

$(A1_{rec})_{i,i+1}$, $(A1^{sat})_{i,i+1}$ – дрейф частоты, соответственно, для часов приемника и спутника,

$(\delta N_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – потери счета циклов,

$(v_{rec}^{sat})_{i,i+1}$ – шумовая составляющая стохастического характера для кода и фазы, соответственно.

Вычитая из формулы (3.2) формулу (3.3), получим выражение для оценки дифференциальной кодовой многолучевости

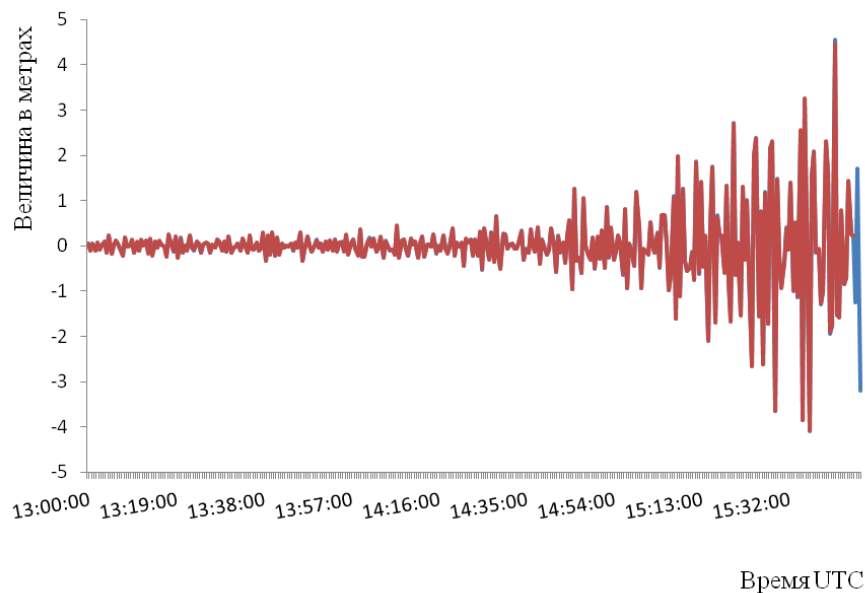
$$\Delta dm_{rec}^{sat} (L1)_{i,i+1} = (\Delta P_{rec}^{sat})_{i,i+1} - (\Delta \Phi_{rec}^{sat})_{i,i+1} - 2 \cdot (\Delta I_{rec}^{sat})_{i,i+1} - (v_{rec}^{sat})_{i,i+1}. \quad (3.4)$$

Для проверки формулы (3.4) оценки дифференциальной кодовой многолучевости был взят суточный файл наблюдений, полученный на пункте IRKJ 24 июня 2015 года. Дискретность записи наблюдений составляет 30 с. Файл наблюдений доступен в сети Интернет, на сайте Международной ГНСС службы (МГС). Из суточного файла наблюдений выделены трехчасовые данные спутников G10, R04 систем GPS и ГЛОНАСС, соответственно. Для учета дифференциального влияния ионосферы использовались данные модели IONEX.

На рисунках 3.18 и 3.20 показана величина дифференциальной кодовой многолучевости по данным спутников G10 и R04, а на рисунках 3.19 и 3.21 показаны результаты сравнения с формулой кодовой многолучевости, приведенной в работе [130].

Формула кодовой многолучевости, приведенная в работе [130], имеет вид

$$dm_{rec}^{sat} (L1) = P_{rec}^{sat} (L1) - \Phi_{rec}^{sat} (L1) + 2 \cdot \lambda_{L1}^2 \cdot \frac{\Phi_{rec}^{sat} (L2) - \Phi_{rec}^{sat} (L1)}{\lambda_{L2}^2 - \lambda_{L1}^2}. \quad (3.5)$$



Синим, вычисленная по формуле (3.4), красным, вычисленная по формуле (3.5)

Рисунок 3.18 – Величина дифференциальной кодовой многолучевости по данным спутника G10 на частоте L1

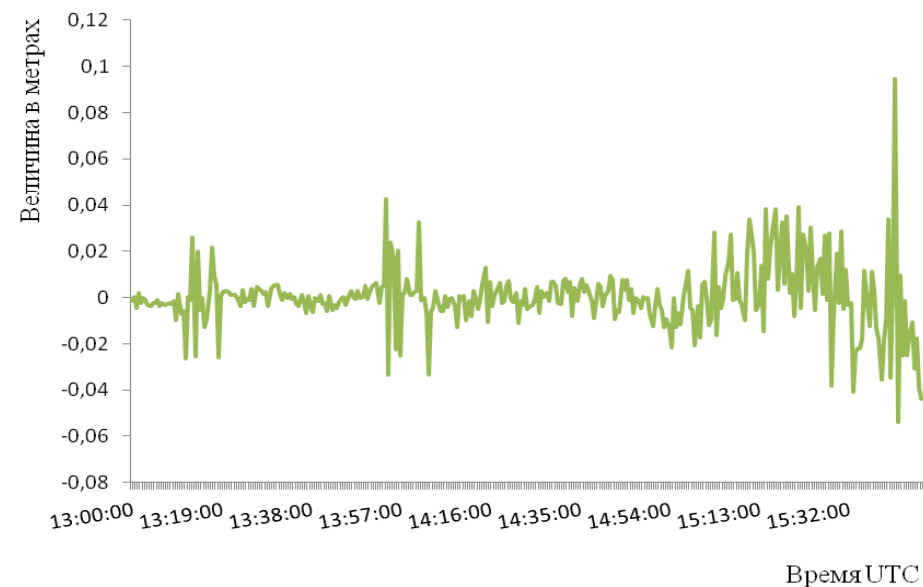
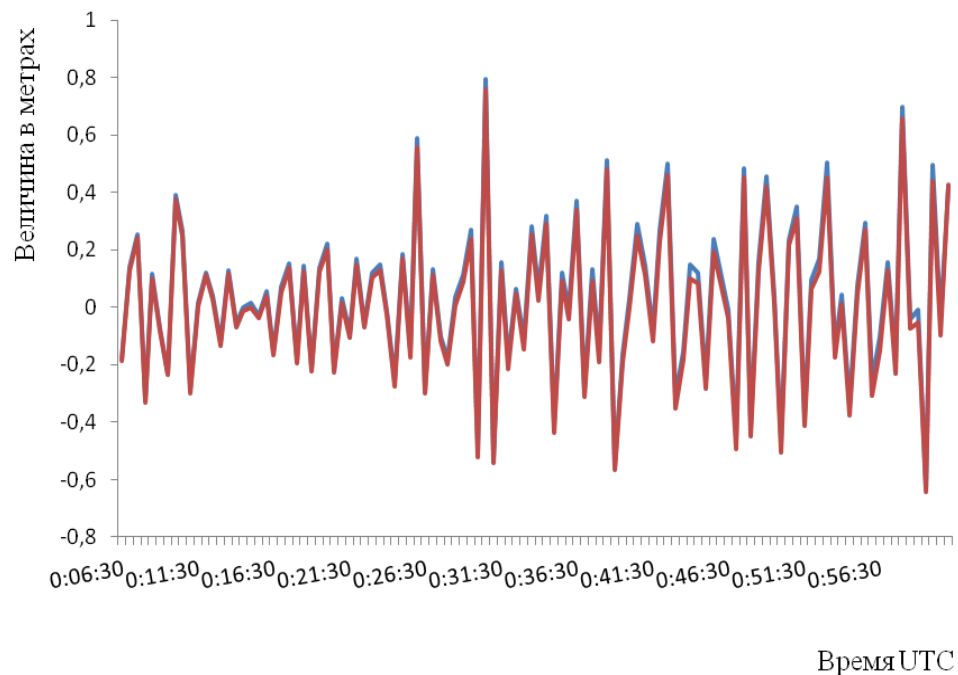


Рисунок 3.19 – Результаты сравнения между дифференциальной кодовой многолучевостью по данным спутника G10 на частоте L1, полученной по формуле (3.4), и вычисленной по формуле (3.5)



Синим, вычисленная по формуле (3.4), красным, вычисленная по формуле (3.5)

Рисунок 3.20 – Величина дифференциальной кодовой многолучевости по данным спутника R04 на частоте L1

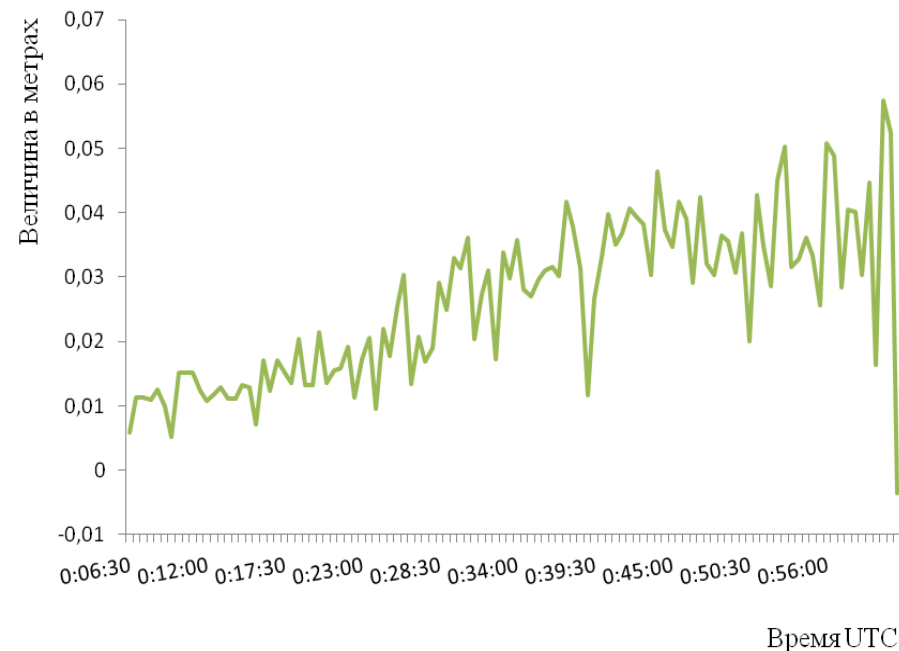


Рисунок 3.21 – Результаты сравнения между дифференциальной кодовой многолучевостью по данным спутника R04 на частоте L1, полученной по формуле (3.4), и вычисленной по формуле (3.5)

Подтверждением использования предложенного алгоритма для оценки дифференциальной кодовой многолучевости будет являться расхождение результатов сравнения с формулой кодовой многолучевости (3.5) на уровне 0,5 циклов (полдлины волны).

На основании рисунков 3.18–3.21 можно утверждать о возможности использования предложенного алгоритма для оценки дифференциального влияния кодовой многолучевости.

Для вывода величины расходимости кодовых и фазовых ГНСС наблюдений возьмем следующие уравнения первых разностей кодовой и фазовой псевдодальности на частоте L1, полученные ГНСС приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_{rec}^{sat} (L1)_{i,1} &= (\Phi_{rec}^{sat})_i - (\Phi_{rec}^{sat})_1 = (\Delta \rho_{rec}^{sat})_{1,i} - (\Delta I_{rec}^{sat})_{1,i} + (\Delta T_{rec}^{sat})_{1,i} + \\ &+ (\Delta \delta m_{rec}^{sat})_{1,i} + ((A1_{rec})_{1,i} - (A1^{sat})_{1,i}) \cdot \Delta t + (\delta N_{rec}^{sat})_{1,i} + (v_{rec}^{sat})_{1,i}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{rec}^{sat} (L1)_{1,i} &= (P_{rec}^{sat})_i - (P_{rec}^{sat})_1 = (\Delta \rho_{rec}^{sat})_{1,i} + (\Delta I_{rec}^{sat})_{1,i} + (\Delta T_{rec}^{sat})_{1,i} + \\ &+ (\Delta dm_{rec}^{sat})_{1,i} + ((A1_{rec})_{1,i} - (A1^{sat})_{1,i}) \cdot \Delta t + (v_{rec}^{sat})_{1,i}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где $(\Delta \rho_{rec}^{sat})_{1,i}$ – изменения в геометрической дальности,

$(\Delta I_{rec}^{sat})_{1,i}$ – изменения в ионосферной задержке, выраженные в линейной мере,

$(\Delta T_{rec}^{sat})_{1,i}$ – изменения в тропосферной задержке, выраженные в линейной мере,

$(\Delta \delta m_{rec}^{sat})_{1,i}$, $(\Delta dm_{rec}^{sat})_{1,i}$ – изменение влияния многолучевости на фазовые и кодовые измерения, соответственно,

$(A1_{rec})_{1,i}$, $(A1^{sat})_{1,i}$ – дрейф частоты, соответственно, для часов приемника и спутника,

$(\delta N_{rec}^{sat})_{1,i}$ – потери счета циклов,

$(v_{rec}^{sat})_{1,i}$ – шумовая составляющая стохастического характера фазы и кода, соответственно.

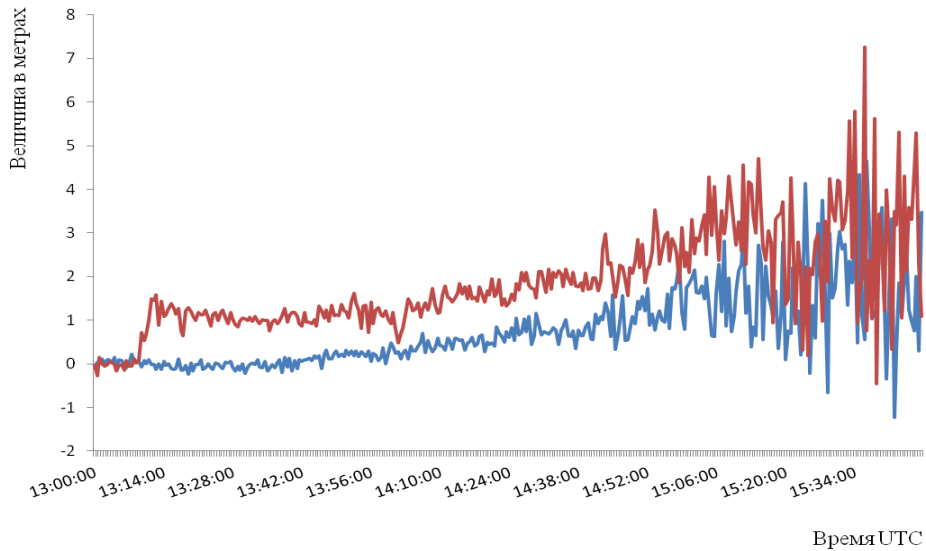
Вычтем из формулы (3.7) формулу (3.6), получим выражение для величины расходимости кодовой и фазовой псевдодальности на частоте L1

$$\begin{aligned} \text{div}_{rec}^{sat}(P, \Phi) = \Delta P_{rec}^{sat}(L1)_{1,i} - \Delta \Phi_{rec}^{sat}(L1)_{1,i} = 2 \cdot (\Delta I_{rec}^{sat})_{1,i} + \\ + (\Delta dm_{rec}^{sat})_{1,i} + (v_{rec}^{sat})_{1,i}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

В случае отсутствия расходимости кодовых и фазовых ГНСС псевдодальностей разность ИЗ будет равна нулю, тогда в остаточных невязках останется только влияние кодовой многолучевости и шума кодовых измерений, вследствие этого кривая должна быть близкой к оси абсцисс, отступая от нее на величину разности влияния многолучевостей. В случае наличия расходимости кодовых и фазовых ГНСС псевдодальностей кривые будут начинаться около нуля, а их максимальные значения будут находиться вблизи точки максимума (максимальной высотой спутника над горизонтом). Величина расходимости будет достигать значений 5 м по абсолютной величине для ночных измерений и 10–15 м для дневных [8].

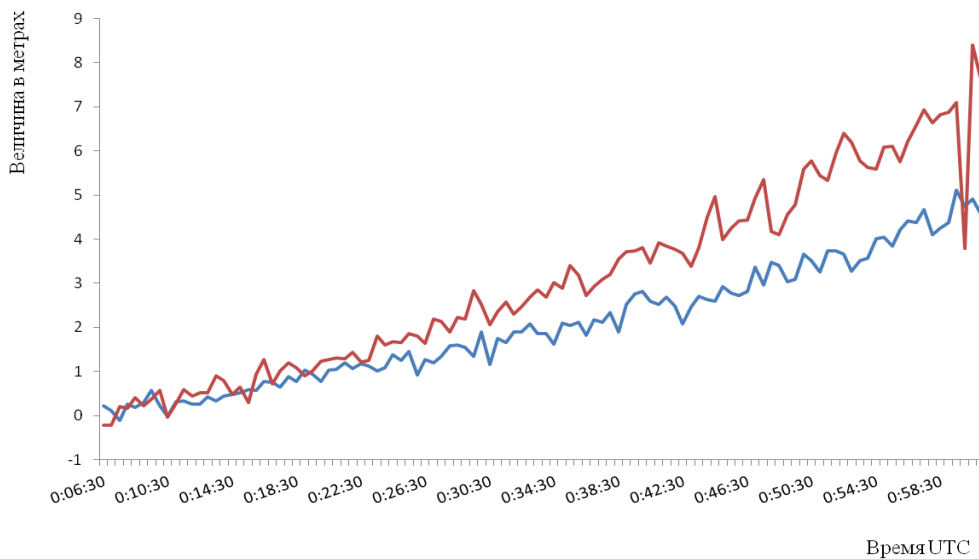
Для проверки формулы (3.7) величины расходимости кодовой и фазовой псевдодальности был взят суточный файл наблюдений, полученный на пункте IRKJ 24 июня 2015 года. Дискретность записи наблюдений составляла 30 с. Файл наблюдений доступен в сети Интернет, на сайте Международной ГНСС службы (МГС). Из суточного файла наблюдений выделены трехчасовые данные спутников G10, R04 систем GPS и ГЛОНАСС, соответственно.

На рисунках 3.22 и 3.23 приведены величины расходимости кодовой и фазовой псевдодальности для спутников G10 системы GPS и R04 системы ГЛОНАСС.



Синим цветом на частоте L1, красным цветом на частоте L2

Рисунок 3.22 – График дивергенции кодовой и фазовой псевдодальности спутника G10 (дневное прохождение)



Синим цветом на частоте L1, красным цветом на частоте L2

Рисунок 3.23 – График дивергенции кодовой и фазовой псевдодальности спутника G10 (ночное прохождение)

Из анализа рисунков 3.22 и 3.23 можно сказать, что вид полученных графиков полностью соответствует случаю, когда ИЗ для кодовых и фазовых ГНСС псевдодальностей имеет противоположный знак. Данное обстоятельство подтверждает наличие расходимости между кодовыми и фазовыми псевдодальностями.

3.6 Выводы по третьему разделу

Разработано и отлажено программное обеспечение, в котором реализована методика контроля фазовых ГНСС измерений, полученных аппаратурой с атомными часами, по приближенным или точным координатам приемника и спутника. Для отладки ПК Cycle slip использовался «эталонный» RINEX файл, полученный в результате обработки в научном программном комплексе ПО ОСТАВА_PPA.

Проведено тестирование программного обеспечения на модельных и реальных данных. Доказано, что разработанная методика и соответствующее программное обеспечение корректно выполняют свои функции: производится контроль фазовых ГНСС измерений, в ходе которого устраняются аномальные погрешности и разрывы в счете циклов непрерывной фазы несущей, а также восстанавливаются пропуски в измерениях.

Выполнены исследования двух фильтров, применяемых для обнаружения аномальных погрешностей: скользящее среднее и адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа.

Доказано, что разработанное программное обеспечение не искажает исходные измерения, но удаляя аномальные погрешности, приводит к повышению точности результатов по внутренней сходимости. Так для чого сеанса с 3 ч до 4 ч 31 марта 2011 года после редактирования в ПК Cycle Slip улучшились следующие статистические характеристики БЛ NVSK-NOVM: σ_{dX} с 16 мм до 6 мм, σ_{dY} с 20 мм до 12 мм, σ_{dZ} с 20 мм до 16 мм, а RMS с 33 мм до 21 мм.

Основные алгоритмы, разработанные в методике контроля ГНСС измерений, использовались для оценки кодовой многолучевости и изучения ионосферной дивергенции. Подтверждено, что в кодовых и фазовых измерениях присутствует ионосферная дивергенция.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработана методика контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, которая позволяет обнаруживать, исключать аномальные погрешности и потери счета циклов, возникающих на этапе предварительной обработки фазовых ГНСС измерений. Обнаружение и корректное исправление фазовых отсчетов играет важную роль в задачах координатно-временного и навигационного обеспечения, в частности, в создании высокоточных спутниковых ГНСС сетей, синхронизации пространственно-разнесенных часов, которые входят в состав беззапросных измерительных станций, применяемых для эфемеридно-временного и навигационного обеспечения, в управлении разнесенными в пространстве объектами и т.д.

В результате проведенного диссертационного исследования поставленная цель достигнута. Итоги выполненных исследований:

а) выполнен анализ методов обнаружения и исключения потерь счета циклов в фазовых ГНСС измерениях, который показал, что разработанные методы контроля фазовых ГНСС измерений используют, в основном, исключительно измерительную информацию, полученную непосредственно в процессе сбора спутниковых измерений;

б) разработана методика контроля статических фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, которая заключается в сравнении первых разностей фазовых псевдодальностей, измеренных одиночным ГНСС приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты с относительной нестабильностью от $3 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-16} , с вычисленными (смоделированными) первыми разностями геометрических дальностей и атмосферных задержек. Разработанная методика может применяться для любых типов фазовых приемников, при этом не зависит от точности входных ГНСС данных, но зависит от точности поправки часов приемника;

в) разработана математическая модель компенсации дифференциального влияния ионосферы, применяемая в разработанной методике контроля фазовых двухчастотных ГНСС измерений, полученных приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты, которая позволяет достоверно учитывать региональные особенности ионосферы, повышая способность разработанной методики корректно обнаруживать, исключать аномальные погрешности и потери счета циклов на этапе предварительной обработки ГНСС данных;

г) разработана адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа, используемая в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, которая повышает эффективность обнаружения, исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов на этапе предварительной обработки ГНСС измерений;

д) создан программный комплекс для проверки методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, реализующий процедуру поиска и исключения потерь счета циклов, возникающих на этапе предварительной обработки фазовых ГНСС измерений. На модуль DiffCalc версия 1.0 получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015661198 от 26 августа 2015 года;

е) выполнена экспериментальная проверка методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений средствами имитационного моделирования и с использованием реальных ГНСС измерений. Доказано, что разработанная методика и соответствующее программное обеспечение корректно выполняют свои функции: производится контроль фазовых ГНСС измерений, в ходе которого устраняются аномальные погрешности и разрывы в счете циклов непрерывной фазы несущей, а также восстанавливаются пропуски в измерениях.

Результаты диссертационных исследований могут применяться не только для обнаружения потерь счета циклов на этапе предварительной обработки данных, но и для сглаживания точных кодовых псевдодальностей по фазе

несущей, исследования локальных моделей тропосферы и ионосферы, мониторинга тропосферы и ионосферы во времени, разработки модели кодовой многолучевости, оценки уровня шума кодовых и фазовых ГНСС псевдодальностей с целью дальнейшего использования данной информации при формировании ковариационной матрицы измерений.

Перспективы научных исследований связаны с расширением направлений использования разработанной методики контроля фазовых ГНСС измерений для обнаружения и исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов в кинематических приложениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст] : монография в 2 т. – М.: Картгеоцентр; Новосибирск: Наука. – 2005. Т.1 – 334 с.; 2006. – Т.2 – 360 с.
- 2 Антонович, К. М. Учет набега фазы при ГНСС измерениях [Текст] / К. М. Антонович // ГЕО-Сибирь-2008: IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т., Новосибирск, 22–24 апр. 2008 г. – Новосибирск : – СГГА, 2008. – Т. 1, ч. 1. – С. 242–245.
- 3 Антонович, К. М. О возможности контроля непрерывной фазы несущей при ГНСС наблюдениях [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // ГЕО-Сибирь-2011: VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т., Новосибирск, 19–29 апр. 2011 г. – Новосибирск : СГГА, 2011. – Т. 1, ч. 2. – С. 164–168.
- 4 Антонович, К. М. Тропосферная задержка при ГНСС наблюдениях [Текст] / К. М. Антонович // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 6–11.
- 5 Антонович, К. М. Метод контроля кодовых и фазовых псевдодальностей в пространстве координат [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – №2/1. – С. 11–15.
- 6 Антонович, К. М. Использование геометрической дальности для контроля ГНСС измерений [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012: VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т., Новосибирск, 10–20 апр. 2012 г. – Новосибирск : СГГА, 2012. – Т. 2. – С. 245–250.
- 7 Антонович, К. М. Оценка многопутности по кодовым данным [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека: тез. докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 30-летию запуска на орбиту первого навигац. космич. аппарата «Глонасс», 10 – 14 окт. 2012 г., Железногорск / под общ. ред. Н. А. Тестоедова;

ОАО «Информационные спутниковые системы»; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2012. – С. 213–215.

8 Антонович, К. М. О расходимости кодовых и фазовых ГНСС псевдодальностей [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т., Новосибирск, 15–26 апр. 2013 г. – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 3. – С. 60–66.

9 Антонович, К. М. Контроль фазовых измерений ГНСС-приемника с атомными часами [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев, Л. А. Липатников // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 3–21.

10 Антонович, К. М. Контроль фазовых измерений спутников ГЛОНАСС, выполненных приемником с атомными часами [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // Геодезия, картография, кадастр – современность и перспективы: Междунар. научно-техн. конф., посвящ. 235-летию основания МИИГАиК, 27-28 мая 2014 г., Москва. – М. : МИИГАиК, 2014. – С. 5–8.

11 Ашджай, Д. Перспективы развития технологий ГНСС [Текст] / Д. Ашджай // Геопрофи. – 2013. – № 1. – С. 46–47.

12 Баранов, В. Н. Космическая геодезия [Текст] / В. Н. Баранов, Е. Г. Бойко, И. И. Краснорылов. – М. : Недра, 1986. – 407 с.

13 Владимиров, В. М. Имитатор измерительной информации для отработки эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС [Текст] / В. М. Владимиров, А. К. Гречкосеев, А. С. Толстикова // Измерит. техника. – 2004. – № 8. – С. 12–14.

14 Воскобойников, Ю. Е. Рекуррентное оценивание вектора состояния динамических систем: учеб. пособие [Текст] / Ю. Е. Воскобойников. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – 125 с.

15 Ганагина, И. Г. О повышении точности определения пространственных координат высокоточных спутниковых геодезических сетей [Текст] / И. Г. Ганагина, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Геопространственные технологии

и сферы их применения: 10-я Междунар. научно-практ. конф., Москва, 14-15 октября 2014 г. – М. : Проспект, 2014. – С. 23–28.

16 Генике, А. А. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии [Текст] / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – М. : Картоцентр: Геодезиздат, 1999. – 272 с.

17 Генике, А. А. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии [Текст] / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – М. : Картоцентр: Геодезиздат, 2004. – 355 с.

18 Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС [Текст] / В. А. Болдин [и др.] / под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. – 2-е изд., исправ. – М.: ИПРЖР, 1999. – 560 с.

19 Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейс. контрол. док. (редакция 5.0) [Электронный ресурс]. – М. : Координац. науч.-информ. центр ВКС России, 2002. – 57 с. – Режим доступа: <http://www.glonass-center.ru>.

20 Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейс. контрол. док. (ред. 5.1) [Электронный ресурс] – М. : Координац. науч. - информ. центр ВКС России, 2008. – 74 с. – Режим доступа: <http://www.glonass-center.ru>

21 ГНСС – технология геодезического обеспечения геологоразведочных работ [Текст] : метод. рекомендации / А.Г. Прихода и [др]. – Новосибирск, СНИИГГиМС, 2008. – 274 с.

22 Горохова, Т. И. Обзор современных методов выявления и восстановления потерь счета циклов при обработке фазовых ГНСС измерений [Текст] / Т. И. Горохова // ГЕО-Сибирь-2008: IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т., Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г. – Новосибирск : СГГА, 2008. – Т. 1, ч. 1. – С. 251–254.

23 Горохова, Т. И. Использование вейвлет-анализа для предварительной обработки результатов одночастотных ГНСС – измерений [Текст] / Т. И. Горохова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 4. – С. 97–101.

24 ГОСТ Р 53608-2009. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических и землеустроительных работ. Разрешение неоднозначности фазовых измерений псевдодалности. Основные положения [Текст] – М. : Изд-во стандартов, 2010. – 11 с.

25 Евстафьев, О. В. Наземная инфраструктура ГНСС для точного позиционирования / под ред. В. В. Грошева [Текст] / О. В. Евстафьев. – М. : Проспект, 2009. – 48 с.

26 Жалило, А. А. Обнаружение, оценка, идентификация и коррекция циклических скачков GPS/EGNOS наблюдений – новый универсальный подход, алгоритмы и экспериментальные результаты [Электронный ресурс] / А. А. Жалило. – 2003. – 30 с. – Режим доступа: http://www.mao.kiev.ua/EOP/ENGLISH/kharkov_centre/articles/zhalilo/zhalilo_20.pdf.

27 Желанов, А. А. Использование глобальных ионосферных карт IGS в задачах высокоточного ГНСС-позиционирования [Текст] / А. А. Желанов, Е. А. Бессонов // Прикладная радиоэлектроника. – 2011. – Т. 10. – № 3. – С. 302–306.

28 Инженерная геодезия [Текст] / Е. Б. Ключин [и др.]; под. ред. Д. Ш. Михилева. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Академия, 2010. – 496 с.

29 Казанцев, М. Ю. Определение ионосферной погрешности измерения псевдодалностей в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS [Электронный ресурс] / М. Ю. Казанцев, Ю. Л. Фатеев // Журнал радиоэлектроники. – 2002. – № 12. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/iso/dec02/6/text.html>.

30 Карпик, А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий [Текст] : монография / А. П. Карпик. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 260 с.

31 Карутин, С. Н. Высокоточный комплекс функционального дополнения глобальных навигационных спутниковых систем [Текст] / С. Н. Карутин // Геодезия и картография. – 2012. – № 12 (спецвыпуск). – С. 25–31.

32 Кешин, М. О. Определение неоднозначностей фаз и исправление ошибок потери цикла в фазовых измерениях спутниковых GPS [Рукопись]: предпринт / М. О. Кешин. – СПб. : ИТА РАН, 1999. – № 67. – 39 с.

33 Ключин, Е. Б. Спутниковые методы измерений в геодезии. Ч. 1 [Текст]: учеб. пособ. / Е. Б. Ключин, А. О. Куприянов, В. В. Шлапак. – М. : МИИГАиК, 2006. – 60 с.

34 Косарев, Н. С. Восстановление фазы несущей: проблемы и пути решения [Текст] / Н. С. Косарев // Вестник СГГА – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 53–60.

35 Косарев, Н. С. Учет влияния атмосферы при контроле фазы несущей в GPS-технологиях [Текст] / Н. С. Косарев // Науки о Земле на современном этапе: материалы IV Междунар. научно-практ. конф., 25 апр. 2012 г. – М. : Спутник+, 2012. – С. 114–118.

36 Косарев, Н. С. Статистический анализ точности определения положений спутников систем ГЛОНАСС и GPS [Текст] / Н. С. Косарев, А. С. Щербаков // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 2 (26). – С. 9–18.

37 Косарев, Н. С. Проблема срывов фазовых наблюдений в методе точного точечного позиционирования [Текст] / Н. С. Косарев, С. О. Шевчук // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014: X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т., Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г. – Новосибирск : СГГА, 2014. – Т. 2. – С. 128–135.

38 Косарев, Н. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661198 / Российская Федерация / DiffCalc версия 1.0 [Текст] / Н. С. Косарев, С. О. Шевчук; заявитель и правообладатель Сиб. гос. ун-т геосистем и технологий (RU); дата поступления 26 авг. 2015 г.; дата регистрации 20 окт. 2015 г.

39 Кошелев, А. В. Физические принципы работы GPS/ГЛОНАСС [Текст]: монография / А. К. Синякин, А. В. Кошелев. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 110 с.

40 Кузьмин, В. И. Физика Земли. Ч. 1: Строение Земли по геофизическим данным [Текст] / В. И. Кузьмин. – Новосибирск: СГГА, 2014. – 204 с.

41 Курошев, Г. Д. Космическая геодезия и глобальные системы позиционирования [Текст] : учеб. пособ / Г. Д. Курошев. – СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2011. – 182 с.

42 Луповка, В. А. Основы космической геодезии с элементами фотограмметрии. Ч. 1 [Текст] : учеб. пособ. / В. А. Луповка, Т. К. Луповка. – М. : МИИГАИК, 2002. – 80 с.

43 Одуан, К. Измерение времени. Основы GPS [Текст] / К. Одуан, Б. Гино. – М. : Техносфера, 2002. – 400 с.

44 Определение разности потенциалов силы тяжести и высот в геодезии посредством гравиметрических и спутниковых измерений [Текст] / В. Ф. Канушин [и др.] // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 53–69.

45 Основные результаты разработок исследовательской группы ХНУРЭ/ГАО НАНУ в области высокоточного ГНСС – позиционирования в период 2002 – 2011 гг. [Текст] / А. А. Жалило [и др.] // Геодезия и картография. – 2012. – № 12 (спецвыпуск). – С. 38–50.

46 Перспективы развития методов обработки результатов спутниковых измерений в геодезии [Текст] / В. А. Малинников [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2011. – № 1. – С. 79–88.

47 Проблемы обеспечения точности координатно-временных определений на основе применения ГЛОНАСС технологий [Текст] / А. С. Толстиков и [др.] // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 3–11.

48 Риле, Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения [Текст] / Ф. Риле; пер. с англ. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 512 с.

49 Стубарев, Д. В. Алгоритмы предварительной обработки псевдодальномерных измерений [Текст] / Д. В. Стубарев, А. С. Толстиков // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр. – Красноярск, КГТУ. – 2004. – С. 425–427.

50 Стубарев, Д. В. Гладкое восполнение пропущенных данных в результатах траекторных измерений [Текст] / Д. В. Стубарев // Вестник СГГА. – 2006. – Вып. 11. – С. 33–38.

51 Стубарев, Д. В. Исключение выбросов в результатах траекторных измерений [Текст] / Д. В. Стубарев, А. С. Толстиков // Вестник СГГА. – 2006. – Вып. 11. – С. 25–29.

52 Стубарев, Д. В. Исследование алгоритмов предварительной обработки данных методами имитационного моделирования [Электронный ресурс] / Д. В. Стубарев. – 2008. – Режим доступа: <http://www.jurnal.org/articles/2008/izmer11.html>.

53 Стубарев, Д. В. Задачи предварительной обработки данных беззапросных измерений [Текст] / Д. В. Стубарев, А. С. Толстиков // ГЕО-Сибирь-2008: IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т., Новосибирск, 22–24 апр. 2008 г. – Новосибирск : СГГА, 2008. – Т. 4, ч. 2. – С. 150–153.

54 Стубарев, Д. В. Использование методов имитационного моделирования для анализа алгоритмов предварительной обработки данных траекторных измерений [Текст] / Д. В. Стубарев, А. С. Толстиков // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 2 (39). – С. 127–136.

55 Стубарев, Д. В. Анализ алгоритмов предварительной обработки данных траекторных измерений методами имитационного моделирования [Текст] / Д. В. Стубарев, А. С. Толстиков // ГЕО-Сибирь-2011: VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т., Новосибирск, 19–29 апр. 2011 г. – Новосибирск : СГГА, 2011. – Т. 5, ч. 2. – С. 186–190.

56 Толстиков, А. С. Устойчивый алгоритм предварительной обработки измерений псевдодальностей в системе ГЛОНАСС [Текст] / А. С. Толстиков, Ю. Е. Воскобойников // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 3 (36). – С. 41–48.

57 Толстиков, А. С. К выбору численных методов интегрирования уравнений движения навигационных спутников [Текст] / А. С. Толстиков, А. А. Карауш // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012: VIII Междунар. науч. конгр. :

Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т., Новосибирск, 10–20 апр. 2012 г. – Новосибирск : СГГА, 2012. – Т. 2. – С. 228–232.

58 Толстиков, А. С. Методы и алгоритмы координатно-временных определений на основе применения спутниковых навигационных технологий [Рукопись]: дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук по спец. 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» и 05.11.16 «Информационно–измерительные и управляющие системы» / Толстиков Александр Сергеевич. – Новосибирск: НГТУ, 2011. – 318 с.

59 Учет дифференциального влияния ионосферы при контроле фазовых двухчастотных ГНСС-измерений приемника с атомными часами [Текст] / К. М. Антонович [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015: XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т., Новосибирск, 13–25 апр. 2015 г. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – Т. 2. – С. 103–110.

60 Учет влияния ионосферной задержки в методике контроля фазовых ГНСС-измерений с использованием эфемерид и координат пункта наблюдений [Текст] / К. М. Антонович [и др.] // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/с. – С. 3–8.

61 Achanta, R. Detection and correction of Global Positioning System carrier phase anomalies [Text] / R. Achanta. – 2004. – 139 p. – Англ.

62 Antonovich, K. M. Future challenges of the small atomic oscillators used in GNSS monitoring systems for structures and natural objects [Text] / K. M. Antonovich, N. S. Kosarev // Intern. Workshop «Integration of point and area-wise geodetic monitoring for structures and natural objects», April 14-15, 2014, SGGGA, Novosibirsk, Russian Federation. – P. 220–222. – Англ.

63 Banville, S. Instantaneous cycle-slip correction for real-time PPP application [Text] / S. Banville, R. Langley // J. of the Institute of Navigation. – 2010. – Vol. 57, No 4. – P. 325–334. – Англ.

64 Banville, S. Cycle slips correction for single-frequency PPP [Text] / S. Banville, R. Langley // Proc. of the 25th Intern. Tech. Meeting of the Satellite Division of The Inst. of Navigation, 17-21 September, 2012. – P. 3753–3761.

65 Banville, S. Mitigating the impact of ionospheric cycle slips in GNSS observations [Text] / S. Banville, R. Langley // J. of Geodesy. – 2013. – Vol. 87, No 2. – P. 179–193. – АНГЛ.

66 Bar-Sever, Y. E. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver [Text] / Y. E. Bar-Sever, P. Kroger, J. A. Börjesson // J. of Geoph. Res. – 1998. – Vol. 103. – P. 5019–5035. – АНГЛ.

67 Bernese GPS Software Version 4.2 [Text] / Edited by U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez. – Astronomical Institute University of Berne. – 2001. – АНГЛ.

68 Bernese GPS Software Version 5.0 [Text] / Edited by U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez. – Astronomical Institute University of Berne. – 2006. – АНГЛ.

69 Bezručka, J. The use of a Kalman filter in geodesy and navigation [Text] / J. Bezručka // Slovak Journal of Civil Engineering. – 2011. – Vol. XIX, No 2. – P. 8–15. – АНГЛ.

70 Bisnath, S. B. Efficient, automated cycle-slip correction of dual frequency kinematic GPS data [Text] / S. B. Bisnath // In Proc. of ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah, 2000. – P. 145–154. – АНГЛ.

71 Bisnath, S. B. A new approach to an old problem Carrier-Phase Cycle Slips [Text] / S. B. Bisnath, K. Donghyun, R. B. Langley // GPS World. – 2001. – Vol. 12, No. 5. – P. 46–51. – АНГЛ.

72 Blewitt, G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km [Text] / G. Blewitt, W. G. Melbourne, W. I. Bertiger et al. // J. of Geoph. Res. – 1989. – Vol. 94, No. B8. – P. 10187–10203. – АНГЛ.

73 Blewitt, G. An automatic editing algorithm for GPS data [Text] / G. Blewitt // J. of Geoph. Res. – 1990. – Vol. 17, No. 3. – P. 199–203. – АНГЛ.

74 Colombo, O. L. Inertial-Aided Cycle-Slip Detection/Correction for Precise, Long-Baseline Kinematic GPS [Text] / O. L. Colombo, U. V. Bhapkar, A. G. Evans // In Proc. of the ION GPS, 14–17 September, 1999. – P. 1915–1921.

75 Cross, P. A. Field validation of GPS phase measurements. [Text] / P. A. Cross, N. Ahmad // Proc. Int. GPS – Workshop, Darmstadt, Apr. 10-13, 1988. – Berlin etc. 1988. – P. 349–360. – АНГЛ.

76 Cannon, M. E. Characterization of GPS Carrier Phase Multipath [Electronic resource] / M. E. Cannon, J. K. Ray. – 1999. – АНГЛ. – Режим доступа: <http://plan.geomatics.ucalgary.ca/papers/99ntmjr.pdf>.

77 Chan, F. C. Reducing the Jitters: How a Chip-Scale Atomic Clock Can Help Mitigate Broadband Interference [Text] / F. C. Chan et al. // GPS World. – 2014. – No. 5. – P. 44 – 50. – АНГЛ.

78 Cohinour, G. C. Global Positioning System Clock and Orbit Statistics and Precise Point Positioning [Electronic resource] / G. C. Cohinour. – 2009. – 149 p. – Режим доступа: <http://etd.ohiolink.edu/view.cgi/Cohenour%20John%20C.pdf?Ohiou1249043829>.

79 Collin, F. Application of wavelet transform for GPS cycle slip correction and Comparison with Kalman Filter [Text] / F. Collin, R. Warnant // Manuscripta Geodetica. – 1995. – Vol. 20. – P. 161–172. – АНГЛ.

80 Davis, J. L. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length [Text] / J. L. Davis et al. // Radio Science. – 1985. – V. 20, No. 6. – P. 1593–1607. – АНГЛ.

81 Donghyun, K. Instantaneous Real-Time Cycle-Slip Correction of Dual-Frequency GPS Data [Text] / K. Donghyun, R. B. Langley // In Proc. of the Intern. Symposium on Kinematics Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, AB, Canada, June 2001. – P. 255–264. – АНГЛ.

82 Donghyun, K. Instantaneous real-time cycle-slip correction for quality control of GPS carrier-phase measurements [Text] / K. Donghyun, R. B. Langley // Inst. of Navigation. – 2002. – Vol. 49. – P. 205–222. – АНГЛ.

83 El-Rabbany, Ah. Introduction to GPS [Text] / Ah. El-Rabbany. – British Library Cataloguing in Publication Data. – 2002. – 176 p. – АНГЛ.

84 Fritsche, M. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates [Электронный ресурс] / M. Fritsche et al. // Geoph. Res. Letters. – 2005. – Vol. 32, No. 23. – Режим доступа: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL024342/full>.

85 GAMIT Reference Manual Release 10.4 [Text] / T. A. Herring, R. W. King, S. C. McClusky. – Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences of Massachusetts Inst. of Tech. – October 2010. – 171 p.

86 Gao, Y. Inertial Aided Cycle Slip Detection and Identification for Integrated PPP GPS and INS [Electronic resource] / Y. Gao, Sh. Du. – 2012. – Режим доступа: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/11/14344/pdf>.

87 Goad, C. On Automatic Precision Airborne GPS Positioning [Text] / C. Goad, M. Yang // Proc. of the Intern. Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation. Banff, Alberta, Canada. August 30-September 2, 1994. – P. 131–138. – АНГЛ.

88 Habrich, H. Geodetic Applications of the Global Navigation Satellite System (GLONASS) and of GLONASS/GPS Combinations [Electronic resource] / H. Habrich. – 1999. – 147 p. – АНГЛ. – Режим доступа: http://www.ifag.de/misk_publ_idx.htm.

89 Harris, B. The GPSTk: an open source GPS toolkit [Text] / B. Harris, R. Mach // J. of GPS Solution. – 2007. – Vol. 11, No. 2. – P. 145–150. – АНГЛ.

90 Hofmann-Wellenhof, B. GPS data pre-processing for cycle slip detection [Text] / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger // Intern. Association of Geodesy Symposium, Edinburgh, Scotland, 2-8 August, 1989. – P. 57–68. – АНГЛ.

91 Hofmann-Wellenhof, B. Global Positioning System. Theory and practice. – Fifth, revised edition [Text] / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins – Wien, New-York: Springer. – 2001. – 384 p. – АНГЛ.

92 Hofmann-Wellenhof, B. GNSS - Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and more [Text] / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle – Wien, New-York: Springer. – 2008. – 516 p. – АНГЛ.

93 IERS Conventions (2003) [Text] / D. D. McCarthy, G. Petit (eds.) – Frankfurt and Main: Central Bureau of IERS. – 2004. – 127 p. – АНГЛ.

94 IGS Data & Products [Electronic resource] / IGS Tracking Network – АНГЛ. – Режим доступа: <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.

95 Interface Control Document ICD-GALILEO-200C. – 196 p. – АНГЛ. – [Electronic resource]. – Режим доступа: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/files/galileo-os-sis-icd-issue1-revision1_en.pdf.

96 Interface Control Document ICD-GPS-200C. – 198 p. – АНГЛ. – [Electronic resource]. – Режим доступа: <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/icd200/default.htm>.

97 Interface Control Document BEIDOU. – 82 p. – АНГЛ. – [Electronic resource]. – Режим доступа: <http://www.beidou.gov.cn/attach/2013/12/26/20131226b8a6182fa73a4ab3a5f107f762283712.pdf>.

98 IONEX [Electronic resource]. – Режим доступа: <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/ionex1.pdf>.

99 Joosten, P. Fixing the ambiguities. Are you sure they're right? [Text] / P. Joosten, C. Tiberius // GPS World. – 2000. – V. 11, No. 5. – P. 46–51. – АНГЛ.

100 Kim, D. Phase Wind-Up Analysis. Assessing Real-Time Kinematic Performance [Text] / D. Kim, L. Serrano, R. Langley // GPS World. – 2006. – Vol. 17, No. 9. – P. 46–51. – АНГЛ.

101 Kitching, J. Time for a Better Receiver: Chip-Scale Atomic Frequency [Text] / J. Kitching // GPS World. – 2007. – No. 11. – P. 52 – 57. – АНГЛ.

102 Kleijer, F. Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling [Electronic resource] / F. Kleijer. – 2004. – 282 p. – АНГЛ. – Режим доступа: <http://enterprise.lr.tudelft.nl/mgp/modules/Papers/failes/kleijer.pdf>.

103 Knedlik, S. Instantaneous Triple-Frequency GPS cycle slip detection and repair [Electronic resource] / S. Knedlik, Zh. Dai, O. Loffeld. – 2009. – Режим доступа: <http://downloads.hindawi.com/journals/ijno/2009/407231.pdf>

104 Kouba, J. A Guide to using international GPS service (IGS) products [Electronic resource] / J. Kouba. – 2003. – 31 p. – Англ. – Режим доступа: <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSProducts.pdf>

105 Kouba, J. A Guide to using international GPS service (IGS) products [Electronic resource] / J. Kouba. – 2009. – 34 p. – Англ. – Режим доступа: <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>

106 Lacy, M. The Bayesian Detection of Discontinuities in a Polynomial Regression and its Application to the Cycle-slip Problem [Text] / M. Lacy et al. // J. of Geodesy. – 2008. – Vol. 82, No. 9. – P. 527–542. – Англ.

107 Langley, R. B. Ionospheric Scintillations [Text] / R. B. Langley // GPS World. – 2012. – Vol. 23, No. 4. – P. 44–51. – Англ.

108 Langley, R. B. GPS Ambiguity Resolution and Validation: Methodologies, Trends and Issues [Electronic resource] / R. B. Langley, D. Kim. – Режим доступа: <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/gnss2000.kim.pdf>

109 Le, A. Q. Phase wind-up effects in precise point with kinematic platforms [Electronic resource] / A. Q. Le, C. Tiberius. – 2006. – 8 p. – Англ. – Режим доступа: http://enterprise.lr.tudelft.nl/publications/files/2007.006_Le_Navtech2006.pdf.

110 Lee, H. K. Effective cycle slip detection and identification for high precision GPS/INS integrated systems [Text] / H. K. Lee, J. L. Wang, C. Rizos // J. of Navigation. – 2003. – Vol. 56. – P. 475–486. – Англ.

111 Leick, A. GPS Satellite Surveying [Text] / A. Leick. – New York: A Willey-Interscience Publication. – 1995. – 560 p. – Англ.

112 Leick, A. GPS Satellite Surveying [Text] / A. Leick. – New York: A Willey-Interscience Publication. – 2004. – 464 p. – Англ.

113 Liu, Zh. A new automated cycle slip detection and repair method for a single dual-frequency GPS receiver [Text] / Zh. Liu // GPS Solution. – 2011. – Vol. 16, No. 3. – P. 353–362. – АНГЛ.

114 Mader, G. L. Calibrating Antenna Phase Centers [Text] / G. L. Mader, F. Czopek // GPS World. – 2002. – Vol. 13, No. 5. – P. 40–46. – АНГЛ.

115 Mader, G. L. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey [Electronic resource] / G. L. Mader. – 2004. – АНГЛ. – Режим доступа: <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>.

116 Melbourne, W. G. The Case for Ranging in GPS Based Geodetic Systems [Text] / W. G. Melbourne // 1st Intern. Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, edited by Clyde Goad, Rockville, Maryland. – 1985. – P. 373–386. – АНГЛ.

117 Misra, P. N. Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance [Text] / P. N. Misra, P. Enge. – 2001. – 390 p. – АНГЛ.

118 Montenbruck, O. The BeiDou Navigation Message [Electronic resource] / O. Montenbruck, P. Steigenberger. – Режим доступа: http://elib.dlr.de/87748/1/IGNSS_13a_BeiDou.pdf.

119 National Geodetic Survey [Electronic resource]. – Режим доступа: <http://www.ngs.noaa.gov>.

120 Quantum SA 45s Chip scale atomic clock [Electronic resource]. – Режим доступа: http://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/133305-quantum-sa-45s-csac.

121 Remondi, B. Global Positioning System carrier phase: description and use [Text] / B. Remondi // Bull. Géodésique. – 1985. – Vol. 59, No.4. – P. 361–377. – АНГЛ.

122 Rizos, Ch. Principles and Practice of GPS Surveying [Electronic resource] / Ch. Rizos. – Version 1.1, September 1999. – Режим доступа: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey. – АНГЛ.

123 Roberts, G. W. Using adaptive filtering to detect multipath and cycle slips in GPS/Accelerometer bridge deflection monitoring data [Text] / G. W. Roberts, X. Meng, A. H. Dodson // FIG XXII Intern. Congress, TS6.2 Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Washington, D.C. USA, 19-26 April. 2002. – P. 1 – 14. – АНГЛ.

124 RTKLIB ver. 2.4.2 Manual [Electronic resource]. – Режим доступа: http://www.rtklib.com/prog/rtklib_2.4.2.zip.

125 Satirapod, C. Multipath Mitigation of Permanent GPS Stations Using Wavelets [Text] / C. Satirapod, R. Khoonphool, C. Rizos // Int. Symp. On GPS/GNSS, Tokyo, Japan, 15-18 November, 2003. – P. 133–139. – АНГЛ.

126 Shkel, A. M. Microtechnology Comes of Age [Text] / A. M. Shkel // GPS World. – 2011. – No. 9. – P. 11–15. – АНГЛ.

127 Schmitz, M. Tests of phase center variations of various GPS antennas, and some results [Text] / M. Schmitz, G. Wübbena, G. Boettcher // GPS Solutions. – 2002. – Vol. 6, No. 1-2. – P. 18–27. – АНГЛ.

128 Schenewerk, M. A brief review of basic GPS orbit interpolation strategies [Electronic resource] / M. Schenewerk // GPS Solutions. – 2003. – Vol. 6, No. 4. – P. 265–267.

129 Seeber, G. Satellite Geodesy [Text] / G. Seeber. – 2-nd edition – Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. – 589 p. – АНГЛ.

130 Simsky A. Triple-frequency combinations in future GNSS [Text] / A. Simsky // Inside GNSS, July/August, 2006. – P. 38–41. – АНГЛ.

131 Symmetricom SA.45s CSAC [Electronic resource]. – Режим доступа: http://www.sematron.com/images/datasheets/Symmetricom_-_CSAC.pdf

132 Teunissen, P. J. G. GPS for geodesy. Teunissen P. J. G., Kleusberg A. (Eds.). [Text] / P. J. G. Teunissen, Y. Bock, G. Beutler et al. – Berlin: Springer, 1998. – 650 p. – АНГЛ.

133 Wang, G. Correction of GPS Carrier Phase Based on Wavelet Transform and Neural Network [Text] / T. Yi, H. Li, G. Wang // 6st Intern. Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2006. – P. 46–50. – АНГЛ.

134 Wang, J. Reducing GPS carrier phase errors with EMD-wavelet for precise static positioning [Text] / J. Wang, J. Wang, C. Roberts // Survey Review. – 2009. – Vol. 41, No 312. – P. 152–161. – АНГЛ.

135 Welch, G. An Introduction to the Kalman Filter [Electronic resource] / G. Welch, G. Bishop. – 2001. – Режим доступа: http://cs.unc.edu/~tracker/media/pdf/SIGGRAPH2001_CoursePack_08.pdf.

136 Wu, J. T. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase [Text] / J. T. Wu, S. C. Wu, G. A. Hajj et al. // Manuscripta Geodaetica. – 1993. – Vol. 18, No 1. – P. 91–98. – АНГЛ.

137 Wübbena, G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements [Text] / G. Wübbena // 1st Intern. Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, edited by Clyde Goad, Rockville, Maryland. – 1985. – P. 403–412. – АНГЛ.

138 Wübbena, G. A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations [Electronic resource] / G. Wübbena et al. // Proc. of the Intern. Techn. Meeting, ION GPS-96, Kansas City, Missouri. – 1996. – Режим доступа: <http://www.geopp.de/pdf/ion96.pdf>.

139 Xu, G. GPS Theory, algorithms and applications [Text] / G. Xu. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. – 2003. – 315 p. – АНГЛ.

140 Xu, G. GPS. Theory, algorithms and applications [Text] / G. Xu. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. – 2007. – 340 p. – АНГЛ.

141 Zhalilo, A. A. Carrier-Phase Cycle-Slip detection and repair of Dual-Frequency GPS data – New Technique using Correlation Filtering Principle [Text] / A. A. Zhalilo // Proc. of the 10th Saint Petersburg Intern. Conference on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg, Russia, 26-28 May, 2003. – P. 273–276. – АНГЛ.

142 Zhalilo, A. A. Carrier-phase cycle-slip detection, estimation and correction of dual-frequency GPS data – new efficient technique, algorithms and experimental results [Text] / A. A. Zhalilo, N. V. Sadanova // MAO-2004, 15-17 July, Kiev, Ukraine, P. 154.

– АНГЛ.

143 Zinas, N. Purpose and Summary Tutorial. – АНГЛ. – [Electronic resource]. – Режим доступа: <http://tekmon.gr/2011/02/>.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- БЛ – базовая линия;
- БИС – беззапросная измерительная станция;
- ВГС – высокоточная геодезическая сеть;
- ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы;
- ИЗ – ионосферная задержка;
- ИСЗ – искусственный спутник Земли;
- ЛК – линейная комбинация;
- МВИ – методика выполнения измерений;
- МНК – метод наименьших квадратов;
- МГС – Международная ГНСС служба;
- ПО – программное обеспечение;
- ПК – программный комплекс;
- СГС-1 – спутниковая геодезическая сеть 1 класса;
- СКП – среднеквадратическая погрешность;
- ТЗ – тропосферная задержка;
- ФАГС – фундаментальная астрономо-геодезическая сеть;
- ФК – фильтр Калмана;
- GPS (Global Positioning System) – система глобального позиционирования;
- IGS (International GNSS Service) – Международная ГНСС служба;
- МСХО (Microcomputer Compensated Crystal Oscillator) – кварцевые осцилляторы с компьютерным управлением;
- Receiver – спутниковый приемник;
- RMS – средняя квадратическая погрешность;
- Satellite – искусственный спутник Земли;
- ТСХО (Temperature Compensated Crystal Oscillator) – температурно-компенсированные кварцевые осцилляторы;
- ТЕС (Total Electron Content) – полное содержание электронов;

ОХСО (Over Compensated Crystal Oscillator) – термостабилизированные кварцевые осцилляторы;

VTEC (Vertical Total Electron Content) – вертикальное полное содержание электронов;

UTC (Universal Time Coordinated) – шкала Всемирного координированного времени.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
АКТЫ ВНЕДРЕНИЙ

	<p>Общество с ограниченной ответственностью «ЗАПСИБГЕОДЕЗИЯ»</p> <p>ИНН 5401247999 КПП 540601001 ОГРН 1055401083418 ОКПО 77564316 ОКВЭД 74.20.3 Юридический адрес 630099 г. Новосибирск, ул. Семьи Шамшиных, д.30 Баш: Филиал ОАО «УралСиб» в г. Новосибирск, Р/с 40702810932050005515 К/с 30101810400000000725 БИК045004725 E-mail: westsibgeo@yandex.ru 電話 (383) 335-13-57 www.westsibgeo.ru (383) 335-13-58</p>
<p>Исх. <u>1054</u> от <u>09.06.2015</u></p>	
<p>АКТ внедрения НИР в ООО «Запсибгеодезия»</p> <p>Разработанная методика контроля спутниковых измерений, выполненных ГНСС приемниками была использована при построении «Высокоточного геодезического полигона» в городе Тюмень. Измерения, выполненные на 10 базовых линиях полигона, показали, что указанная методика уменьшает среднеквадратические погрешности компонентов векторов базовых линий в 1,5 раза по сравнению со стандартной методикой.</p> <p>Разработанная в результате проведенных исследований методика контроля измерений, выполненных ГНСС приемниками, внедрена в ООО «Запсибгеодезия».</p>	
<p>Директор</p> 	 <p>Чермошентцев Ю.А.</p>

Рисунок А.1 – Акт внедрения в ООО «Запсибгеодезия» при построении метрологического пространственного полигона в городе Тюмень



АКТ

о внедрении результатов НИР в работу отдела метрологии, стандартизации и сертификации

Разработанная методика контроля спутниковых измерений, выполненных ГНСС-приемниками с атомными часами, была использована при построении геодезической сети Эталонного пространственного полигона Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). Измерения, выполненные на четырёх базовых линиях полигона, показали, что указанная методика уменьшает среднеквадратические погрешности компонентов векторов базовых линий в 1,5 – 2 раза по сравнению с обычной методикой без применения атомных часов.

Разработанная в результате проведенных исследований методика контроля измерений, выполненных ГНСС-приемниками с атомными часами **внедрена в работу** метрологического отдела метрологии, стандартизации и сертификации СГУГиТ при поверке глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС.

Руководитель отдела
метрологии, стандартизации
и сертификации СГУГиТ



Л. Г. Куликова

Рисунок А.2 – Акт внедрения в работу отдела метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ) при построении геодезической сети Эталонного пространственного полигона



о внедрении результатов НИР в учебный процесс

Разработка научно-методических основ контроля фазовых ГНСС измерений выполнена в рамках научно-исследовательской работы «Разработка принципов и методологических основ навигации подвижных объектов с использованием наземной инфраструктуры ГЛОНАСС» (задание №2014/141, проект 1527) в научно-исследовательском секторе в Сибирском государственном университете геосистем и технологий.

Результаты полученных исследований внедрены в учебный процесс на основании рекомендаций кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования (протокол № 8 от «19» января 2016 г.) и решения учёного совета Института геодезии и менеджмента (протокол № 5 от «27» января 2016 г.), а именно:

- в лекционных и практических курсах для студентов по направлению 21.03.03 «Геодезия и дистанционное зондирование» по дисциплинам «Спутниковые системы и технологии позиционирования», «Современные средства спутниковых наблюдений» (профили «Геодезия», «Космическая геодезия и навигация»), «Космическая навигация» (профиль «Космическая геодезия и навигация»);
- в дипломном проектировании.

Заведующая кафедрой
Физической геодезии и
дистанционного зондирования

Ганагина И.Г.

Директор Института геодезии
и менеджмента

Середович С.В.

Начальник учебного
управления

Горбенко С.М.

Рисунок А.3 – Акт внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

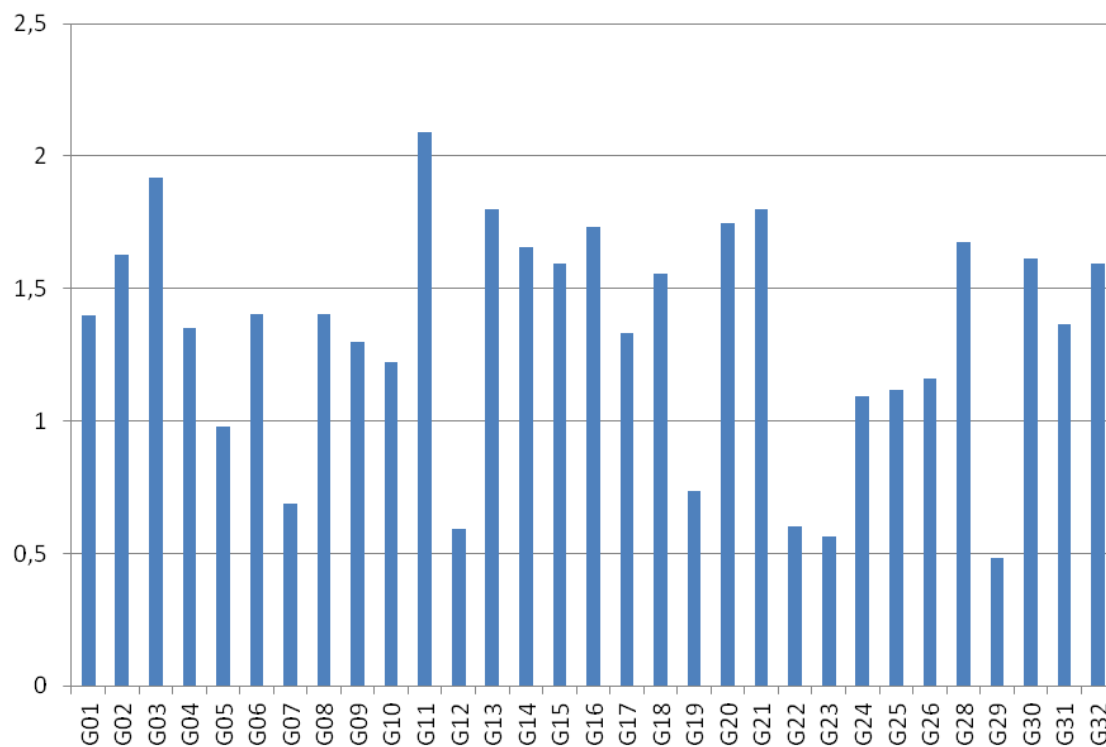
ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ СПУТНИКОВ
ГЛОНАСС И GPS ПО БОРТОВОЙ ЭФЕМЕРИДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рисунок Б.1 – Абсолютные погрешности (в метрах) определения положения спутников системы GPS на 1 января 2013 года

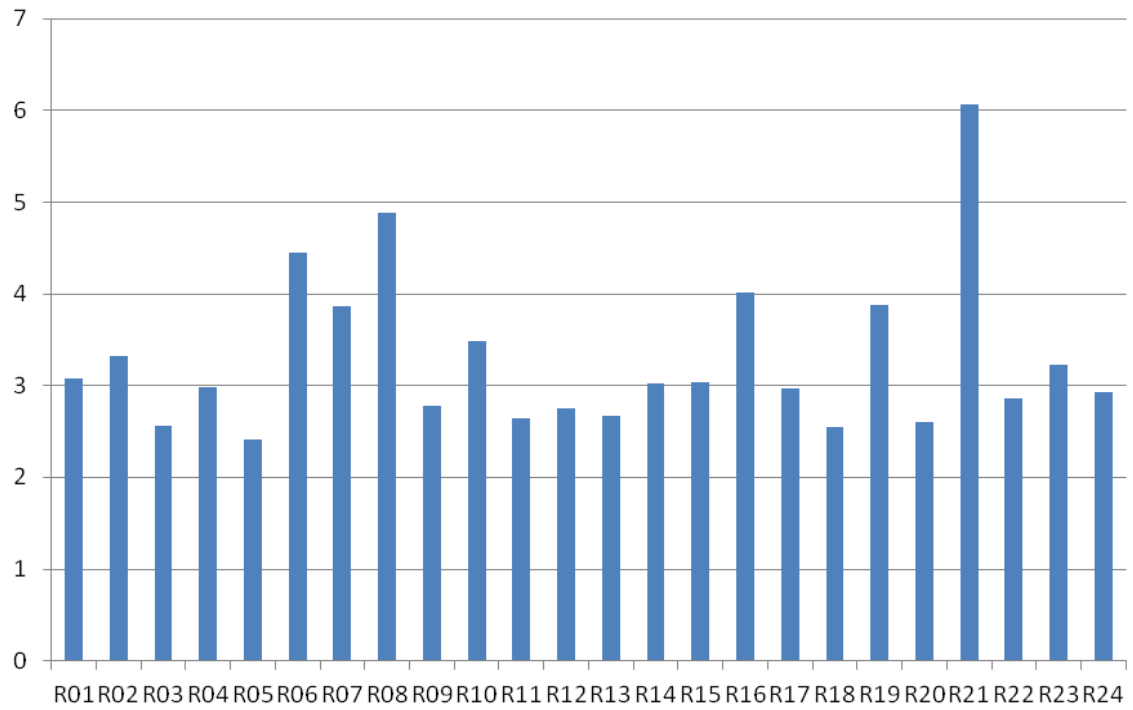
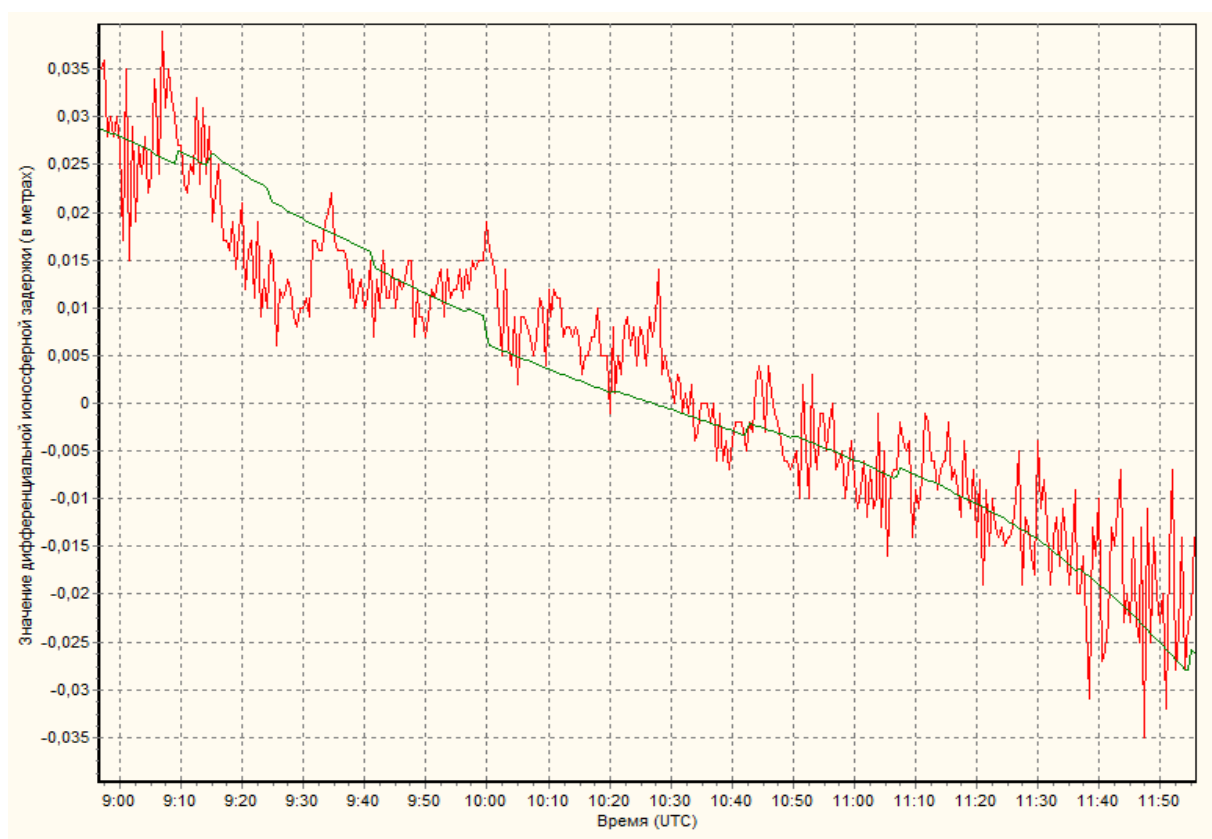


Рисунок Б.2 – Абсолютные значения погрешностей (в метрах) определения положения спутников системы ГЛОНАСС на 1 января 2013 года

ПРИЛОЖЕНИЕ В

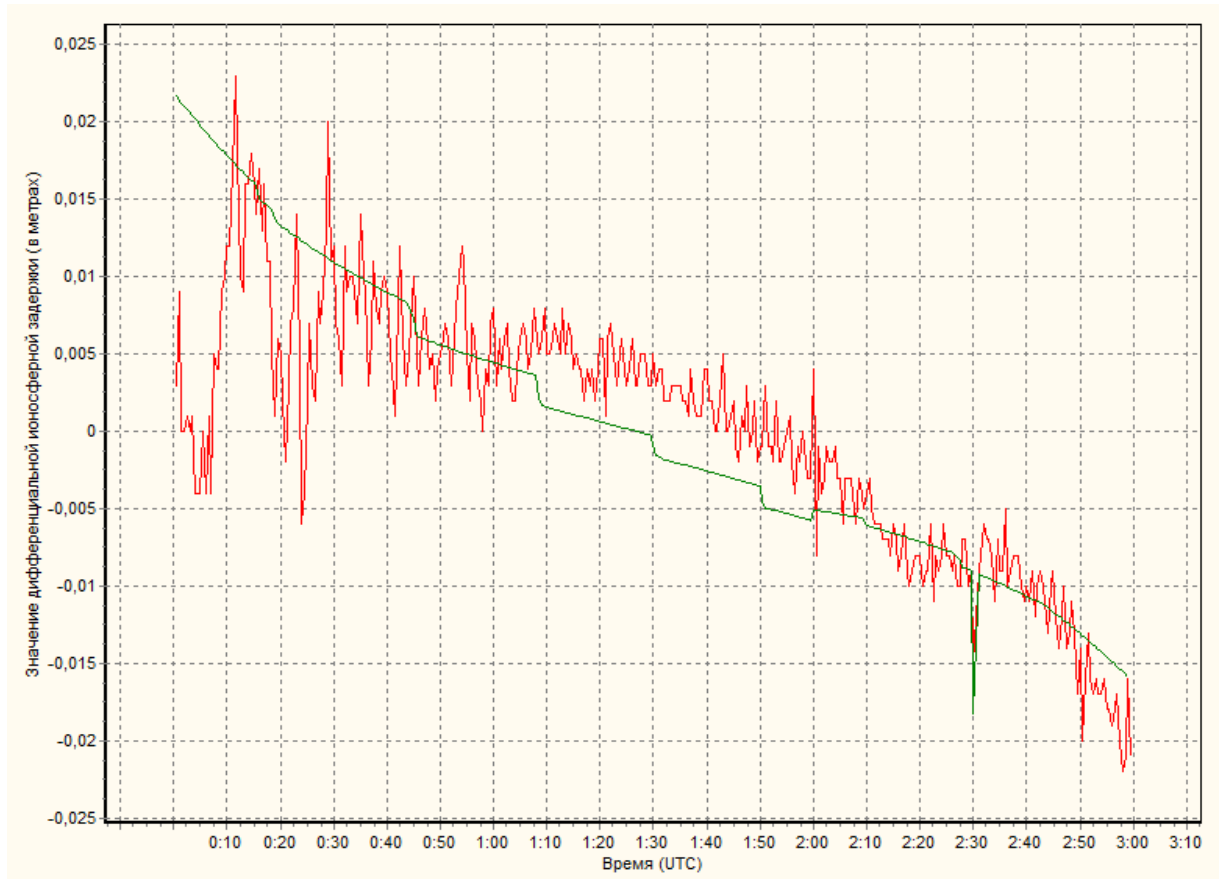
(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА УЧЕТА
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХЧАСТОТНЫХ ФАЗОВЫХ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПРИЕМНИКОМ, ПОДКЛЮЧЕННЫМ К
ВЫСОКОСТАБИЛЬНОМУ АТОМНОМУ СТАНДАРТУ ЧАСТОТЫ



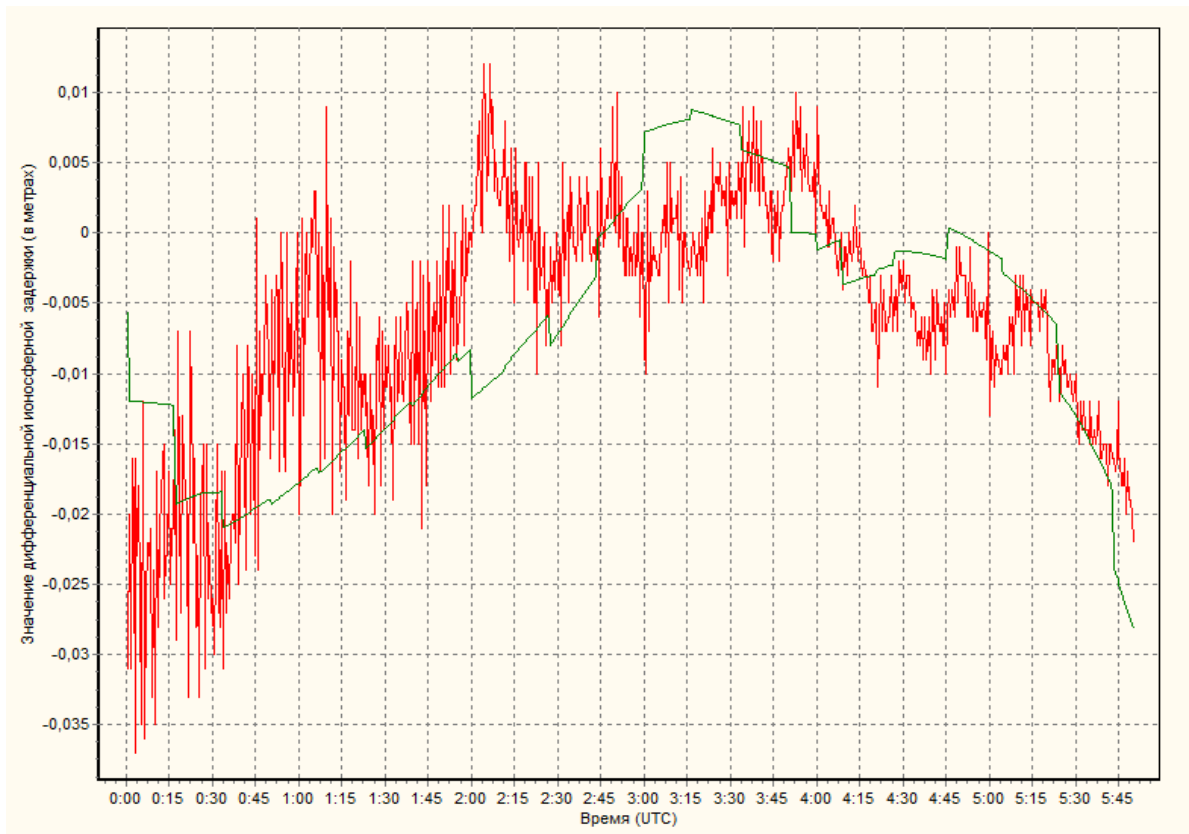
Красный цвет – измеренные данные, зеленый цвет – модель GIM IONEX

Рисунок В.1 – Величина дифференциальной ионосферной задержки для частоты L1 спутника G01 на станции NOVМ, дата 1 января 2015 года



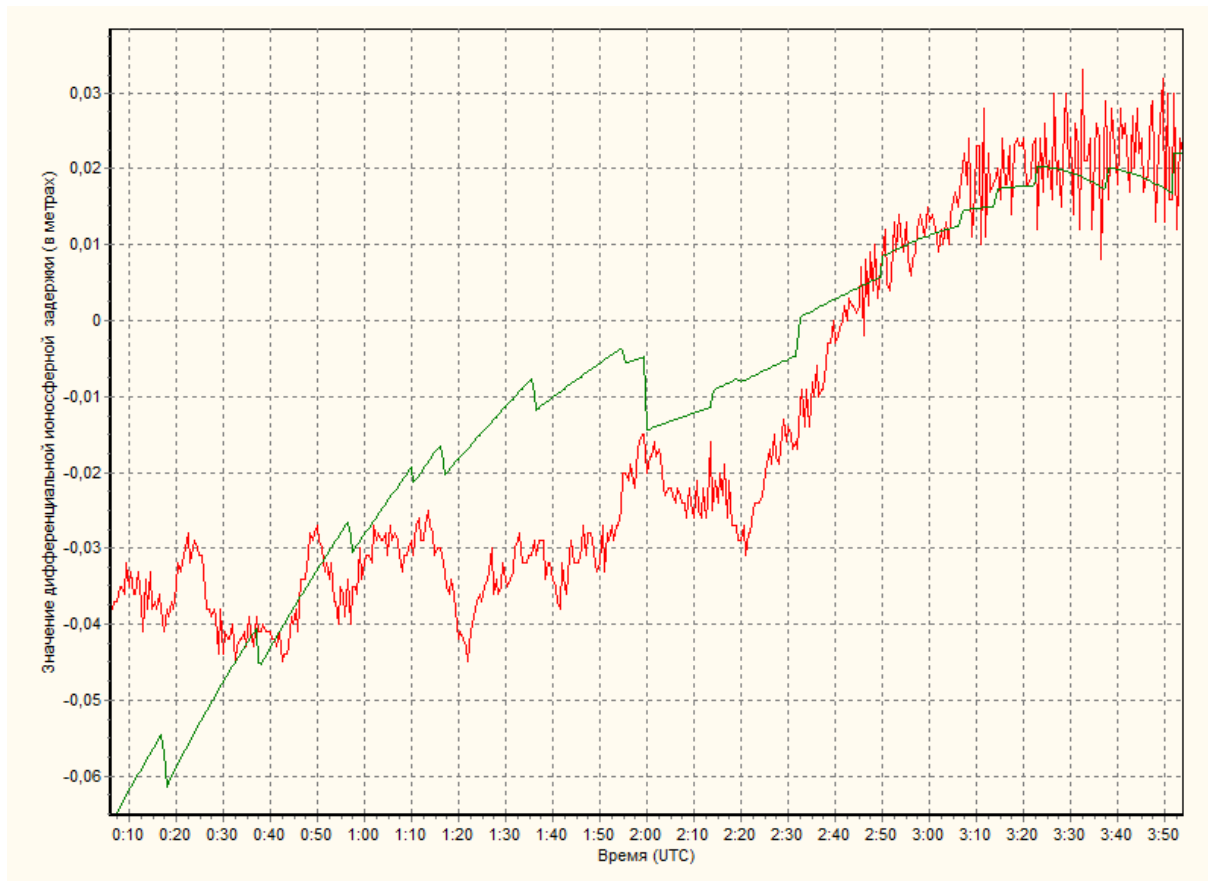
Красный цвет – измеренные данные, зеленый цвет – модель GIM IONEX

Рисунок В.2 – Величина дифференциальной ионосферной задержки для частоты L1 спутника R01 на станции NOVМ, дата 1 января 2015 года



Красный цвет – измеренные данные, зеленый цвет – модель GIM IONEX

Рисунок В.3 – Величина дифференциальной ионосферной задержки для частоты L1 спутника G24 на станции СОСО, дата 1 января 2015 года



Красный цвет – измеренные данные, зеленый цвет – модель GIM IONEX

Рисунок В.4 – Величина дифференциальной ионосферной задержки для частоты L1 спутника G01 на станции ТАН2, дата 1 января 2015 года

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

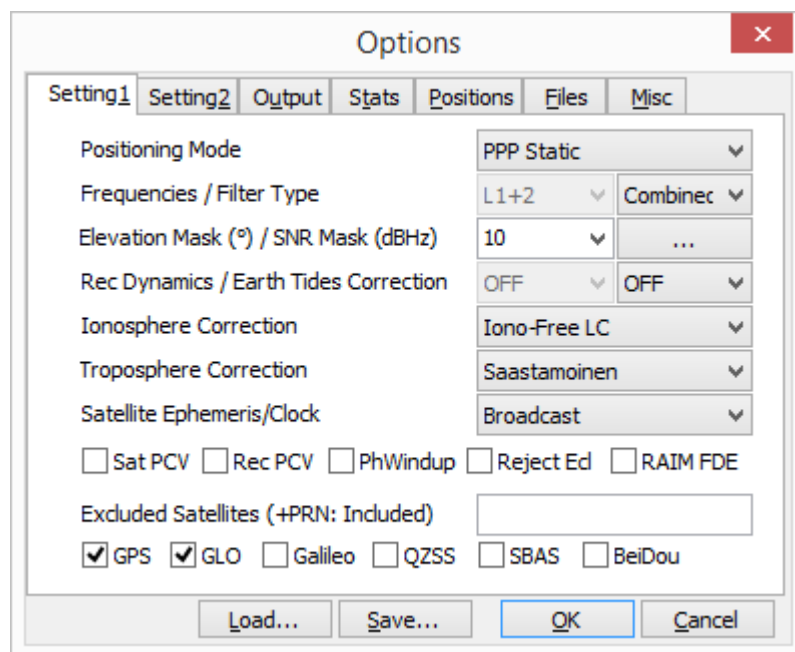
НАСТРОЙКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА RTKPROST ДЛЯ
ОБРАБОТКИ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ PPP

Рисунок Д.1 – Установка 1

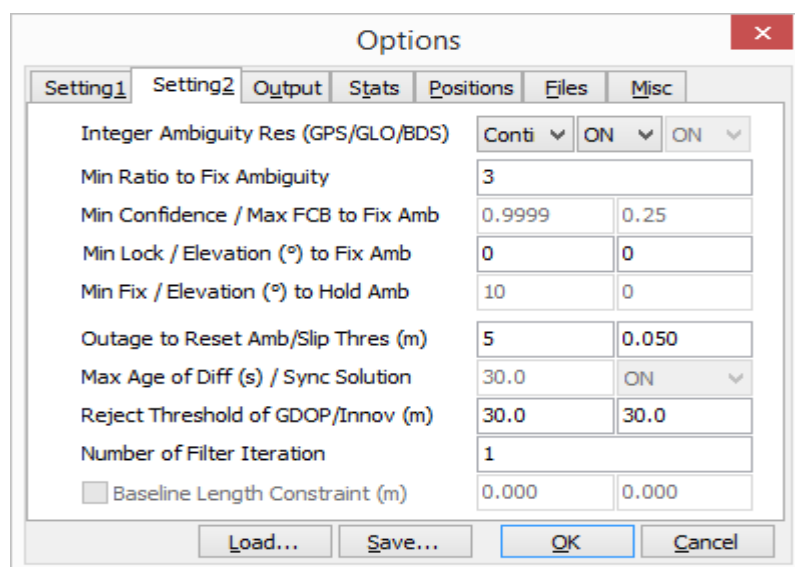


Рисунок Д.2 – Установка 2

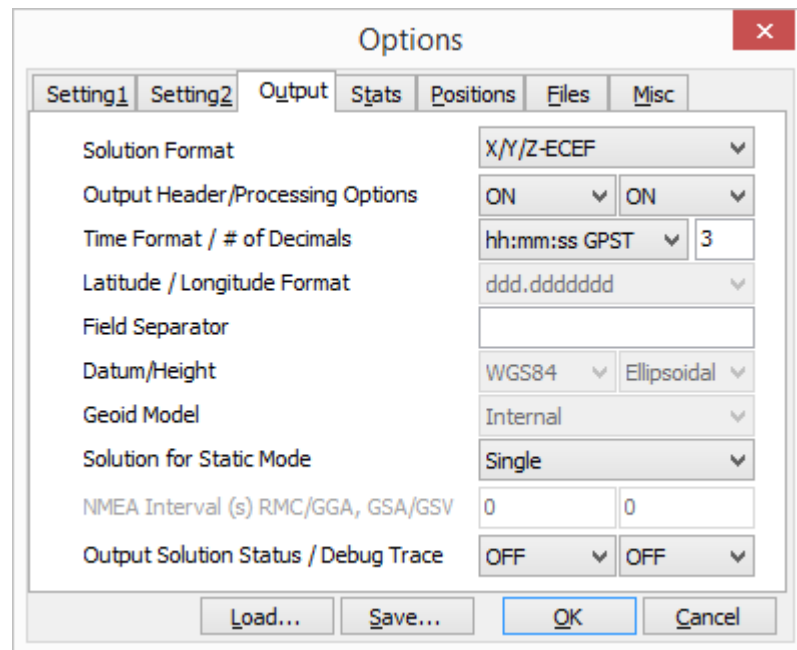


Рисунок Д.3 – Настройка выходных данных

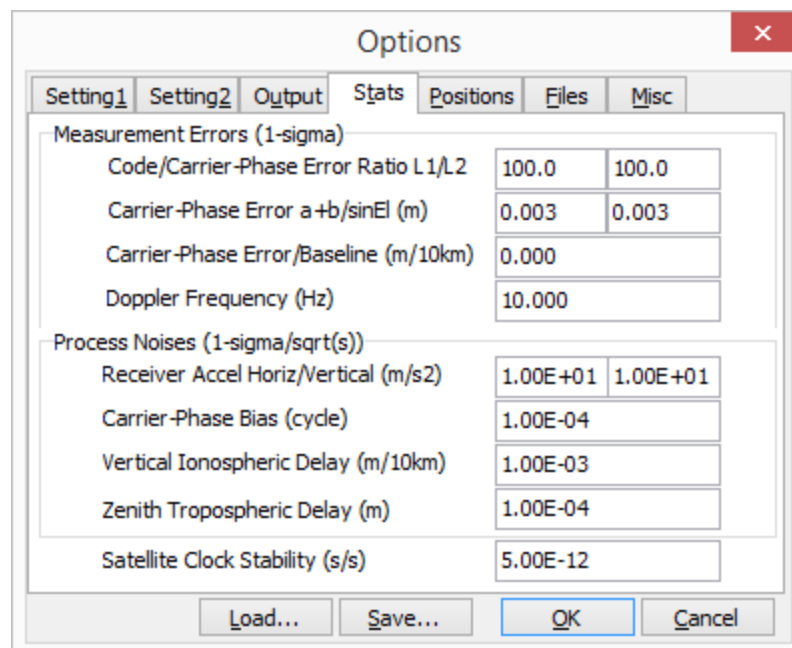


Рисунок Д.4 – Настройка предельных значений ошибок

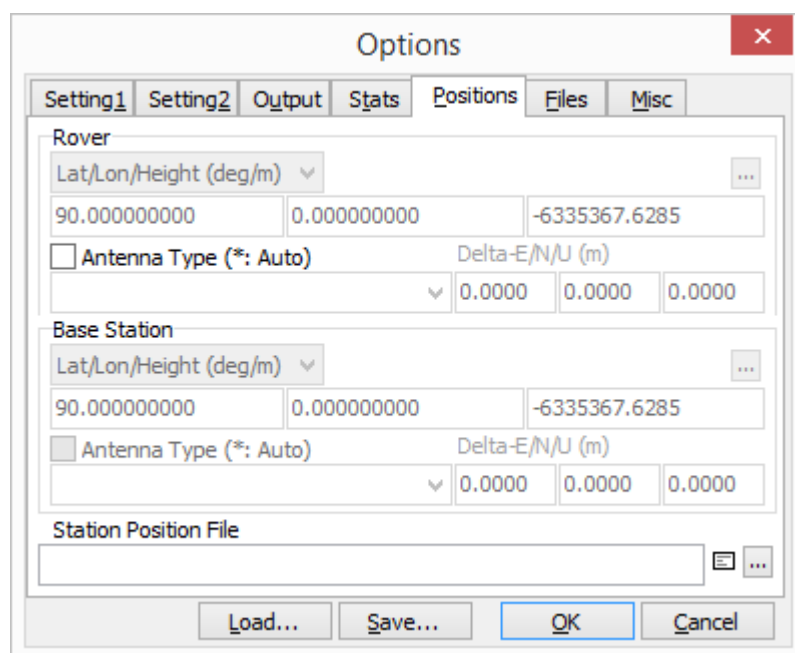


Рисунок Д.5 – Настройка положения базовой станции и мобильного приемника

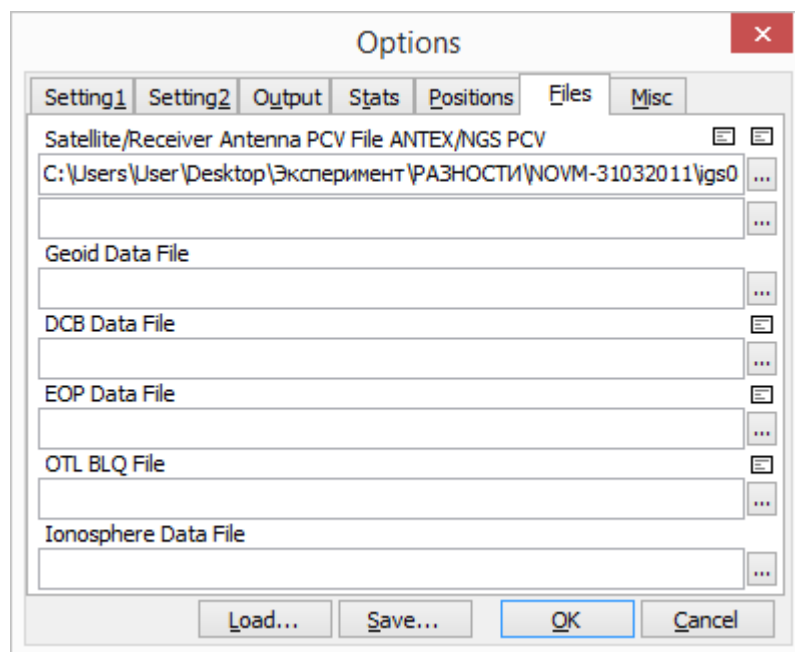


Рисунок Д.6 – Загрузка файлов данных

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ

ОСТАВА_РРА

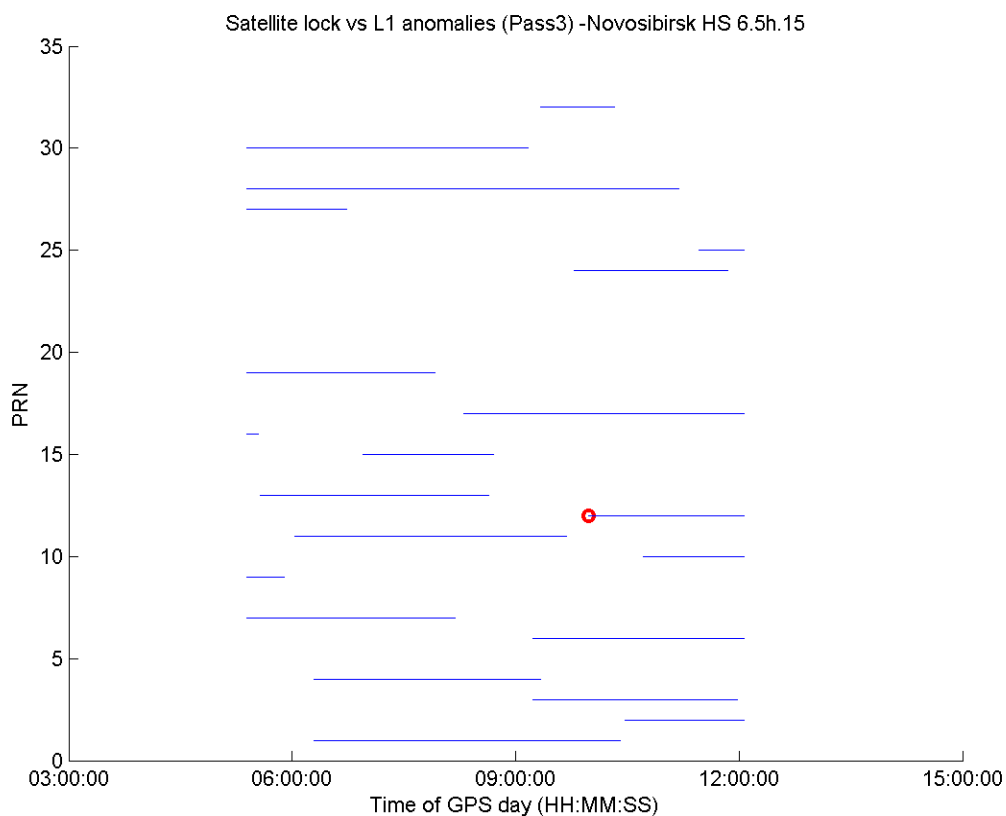


Рисунок Е.1 – Аномальные последовательности фазовых скачков, которые обнаружены путем анализа кодово-фазовых ЛК

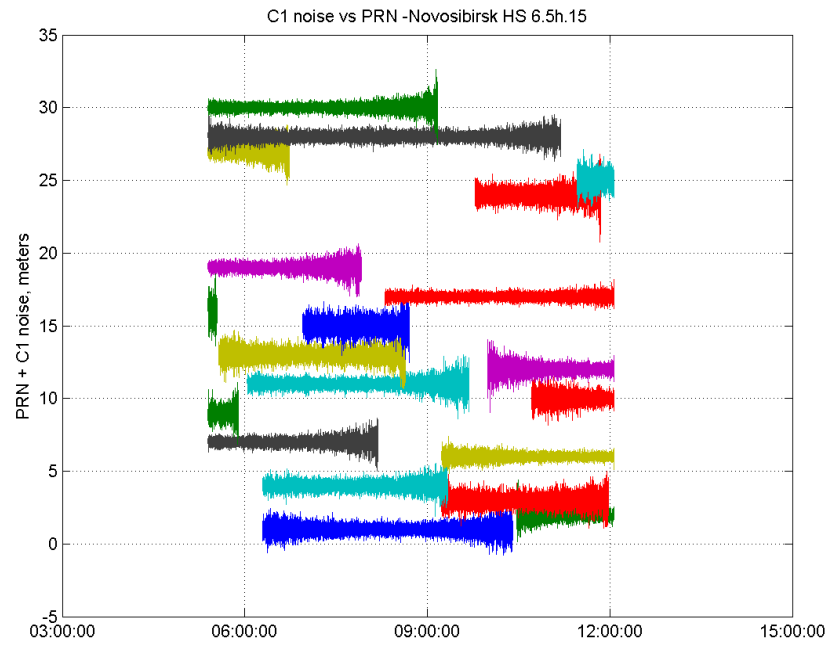


Рисунок Е.2 – Оценки уровня шума кодовых наблюдений C1 для каждого спутника, м. Время UTC

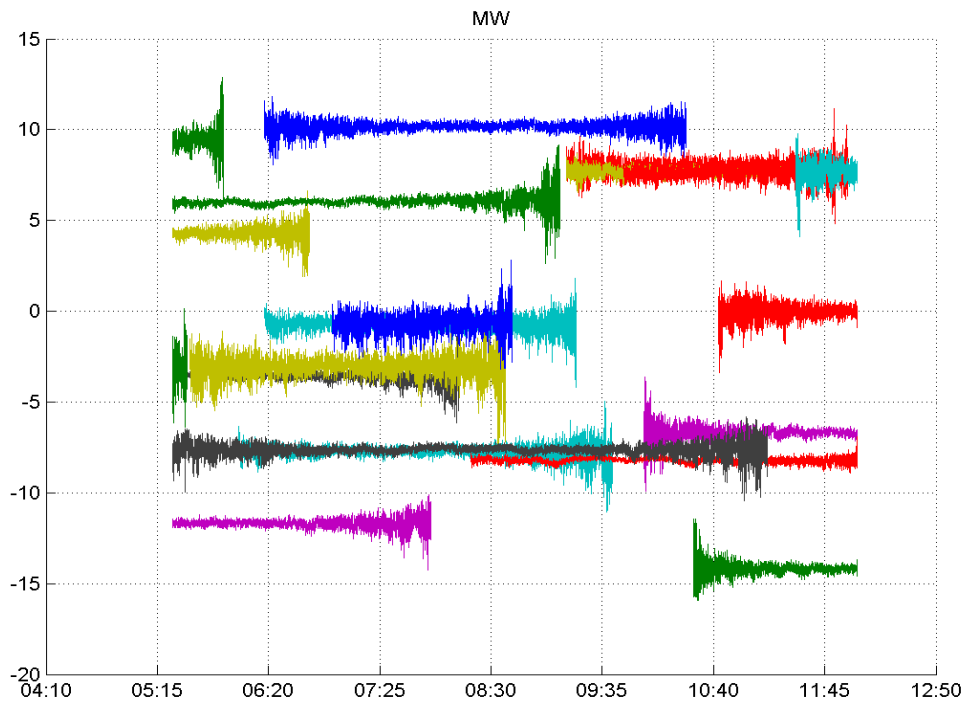


Рисунок Е.3 – Оценки линейной комбинации Melbourne-Wubben для каждого спутника, м. Время UTC

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(обязательное)

ОСТАТОЧНЫЕ РАЗНОСТИ МЕЖДУ ИЗМЕРЕННЫМИ И СМОДЕЛИРОВАННЫМИ ДАННЫМИ

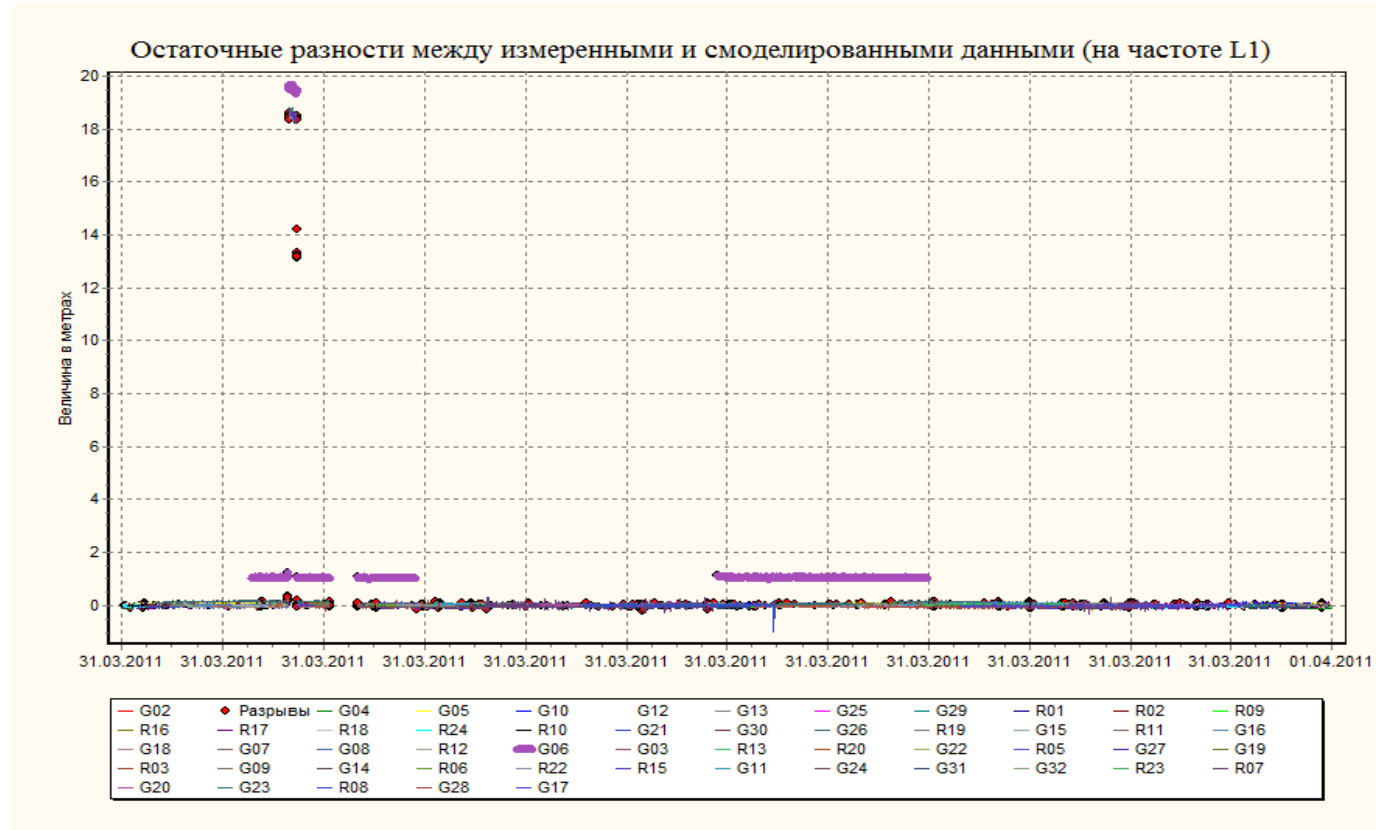


Рисунок Ж.1 – Остаточные разности (на частоте L1) на пункте NOVМ 31 марта 2011 года

Остаточные разности между измеренными и смоделированными данными (на частоте L2)

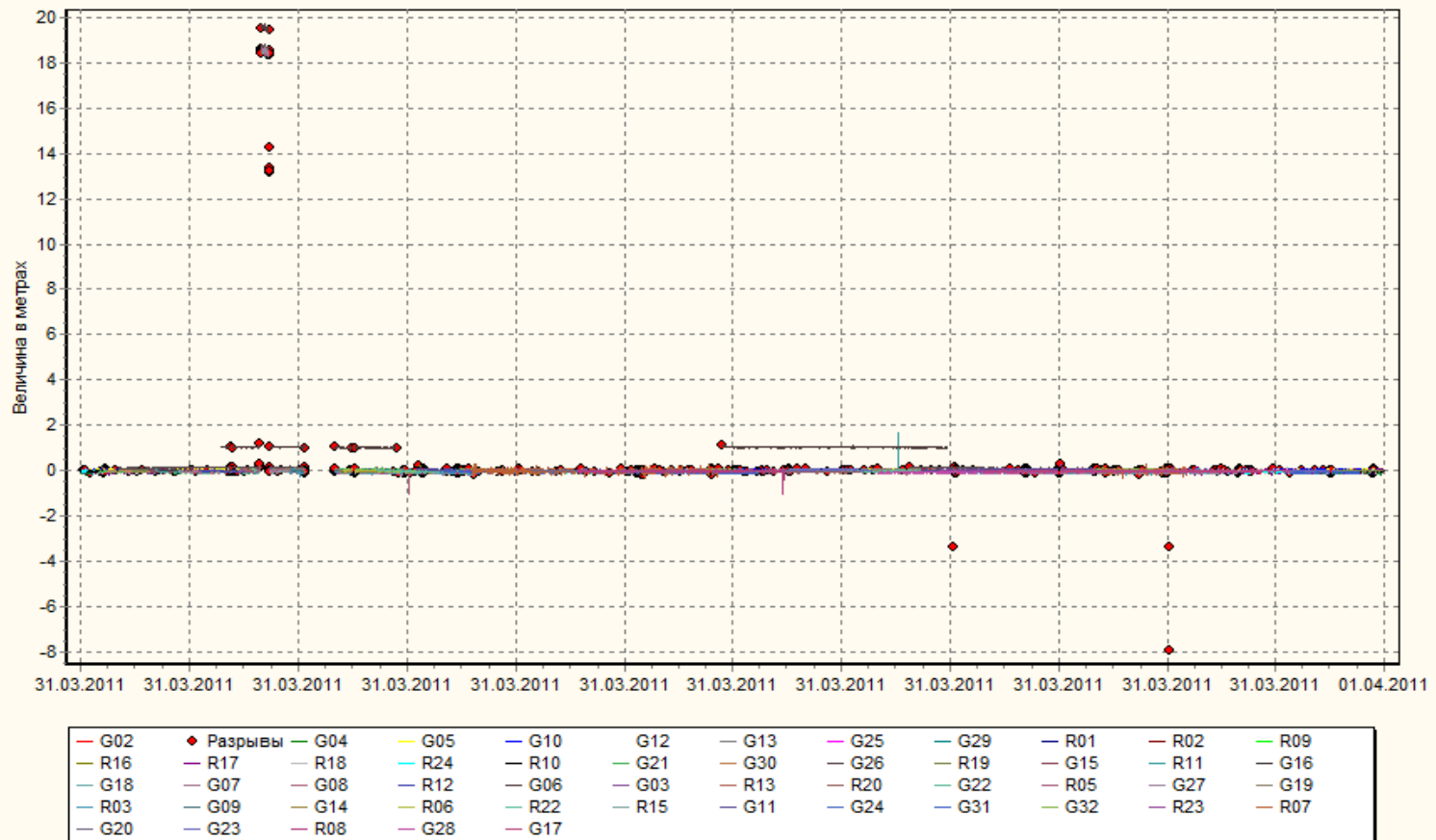


Рисунок Ж.2 – Остаточные разности (на частоте L2) на пункте NOVМ 31 марта 2011 года

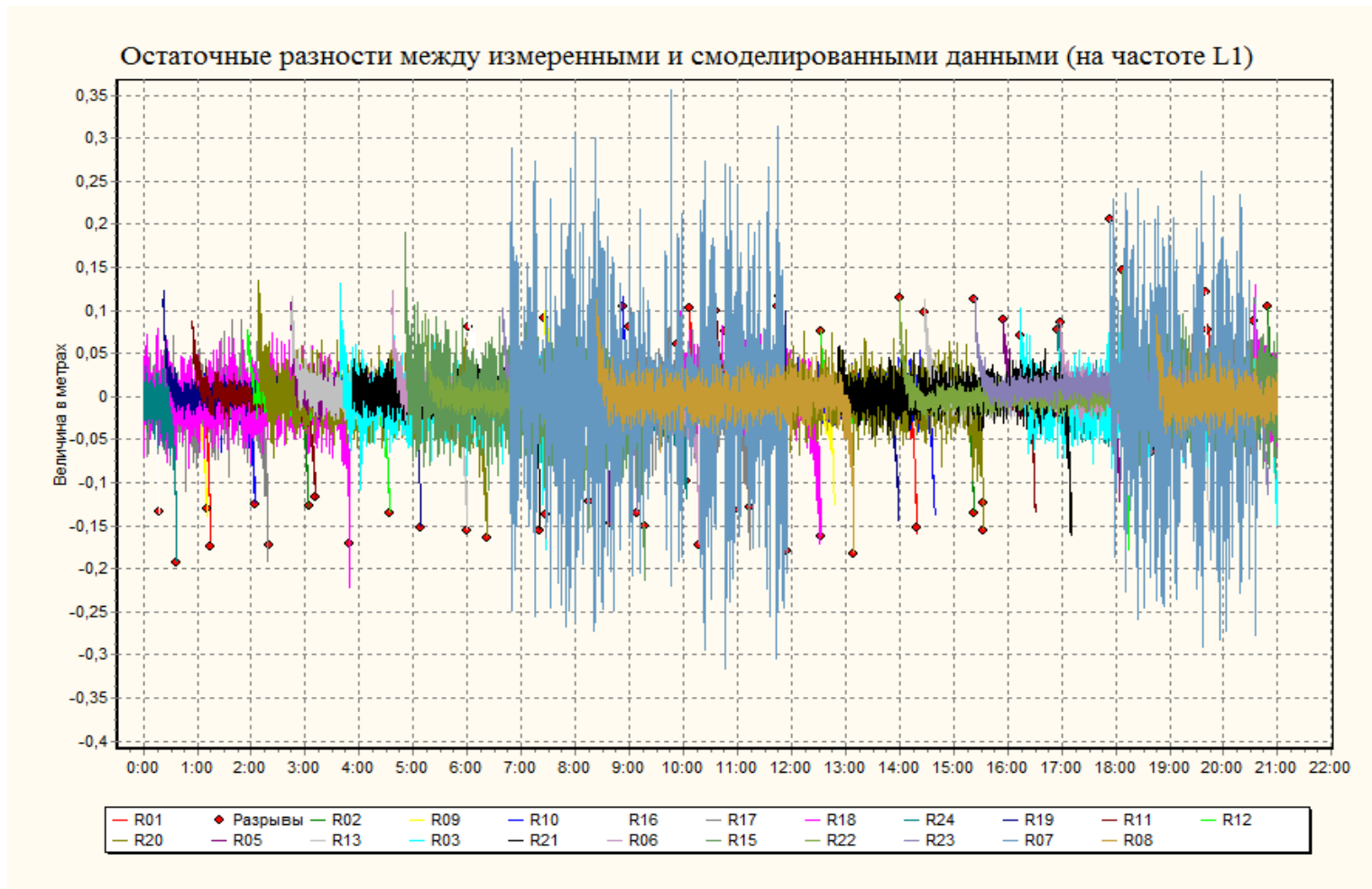


Рисунок Ж.3 – Остаточные разности (на частоте L1) на пункте NSKM 31 марта 2011 года

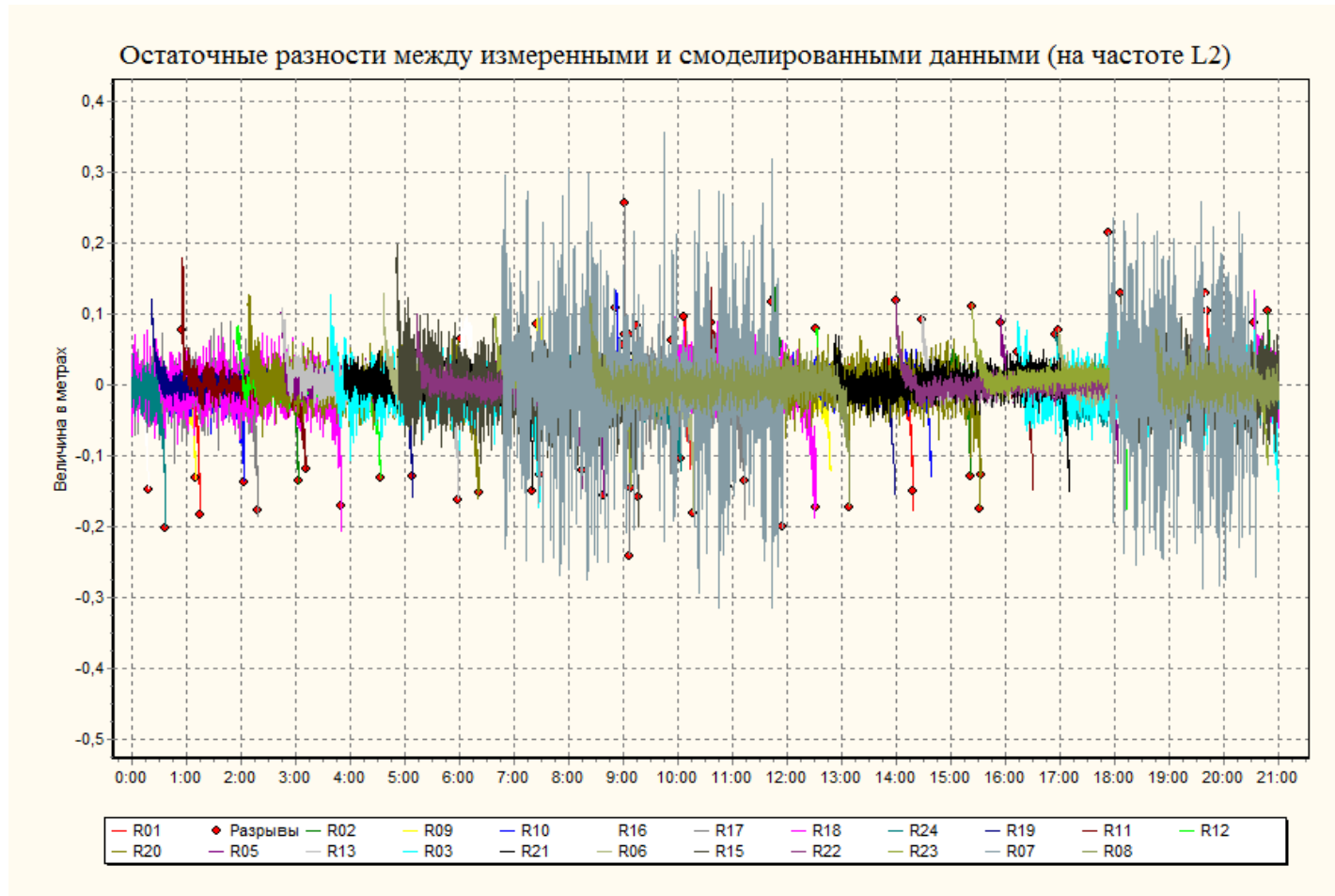


Рисунок Ж.4 – Остаточные разности (на частоте L2) на пункте NSKM 31 марта 2011 года

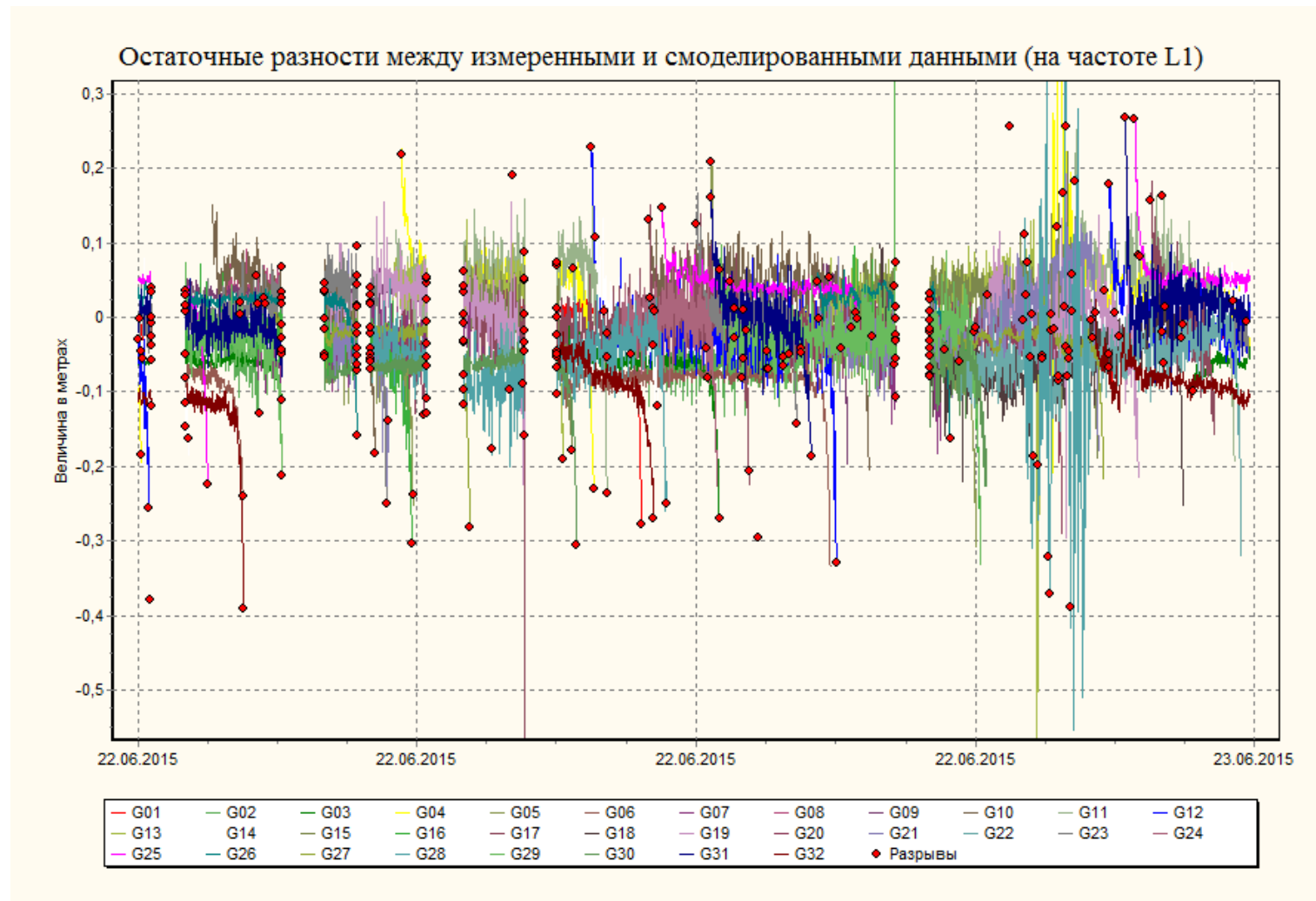


Рисунок Ж.5 – Остаточные разности (на частоте L1) на пункте NOVМ 22 июня 2015 года

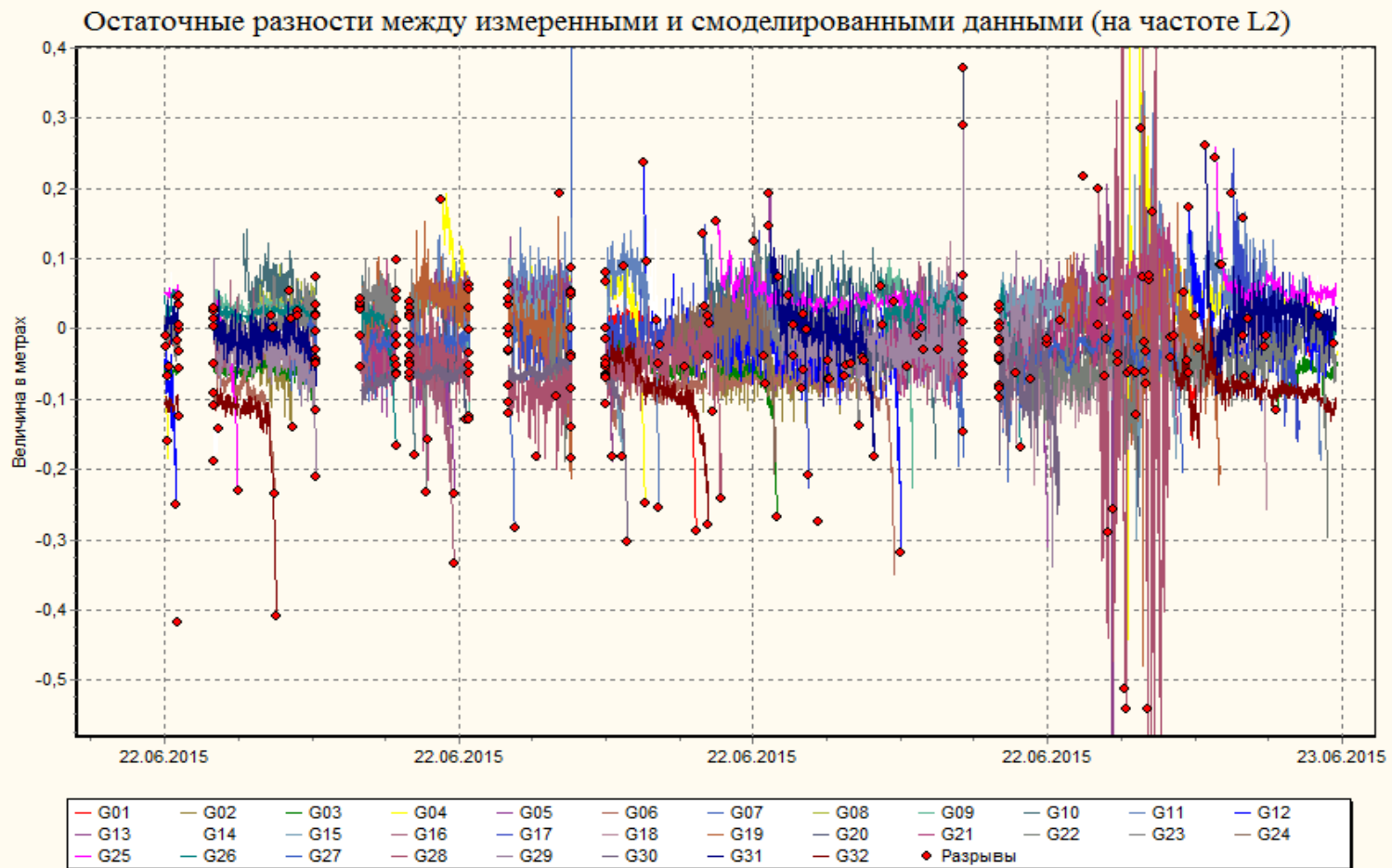


Рисунок Ж.6 – Остаточные разности (на частоте L2) на пункте NOVМ 22 июня 2015 года

Остаточные разности между измеренными и смоделированными данными (на частоте L1)

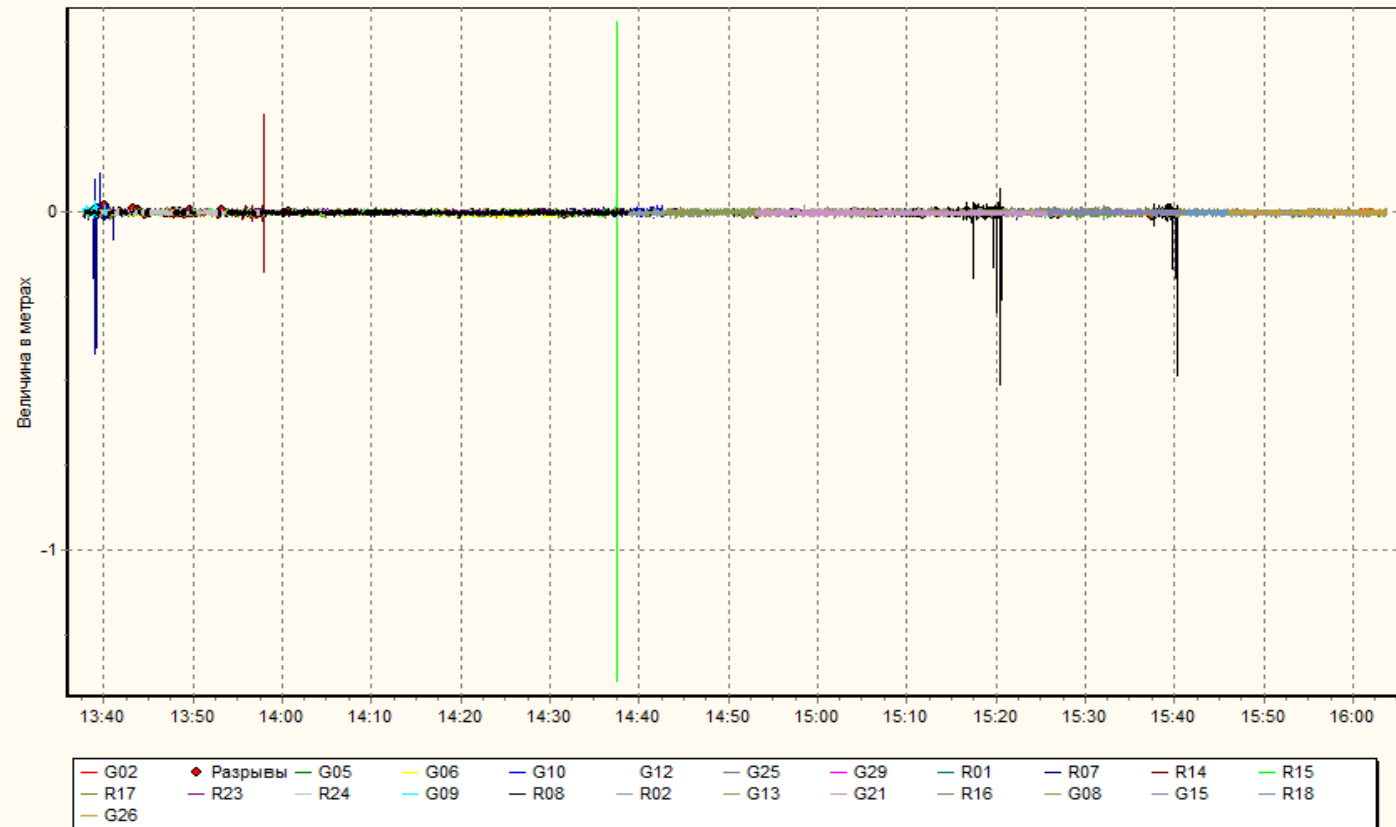


Рисунок Ж.7 – Остаточные разности (на частоте L1) на пункте SHEB 24 июня 2015 года

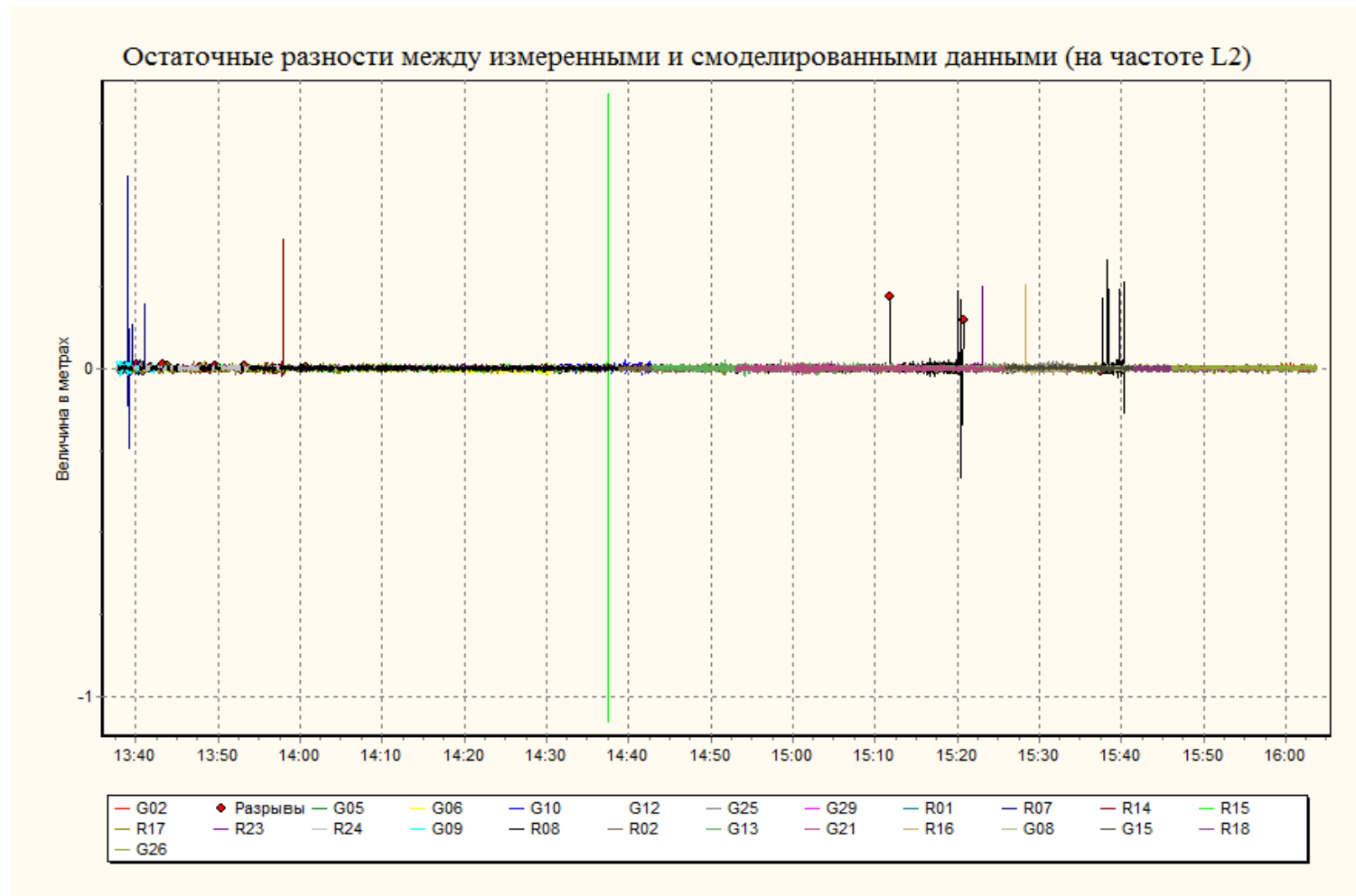


Рисунок Ж.8 – Остаточные разности (на частоте L2) на пункте SHEB 24 июня 2015 года

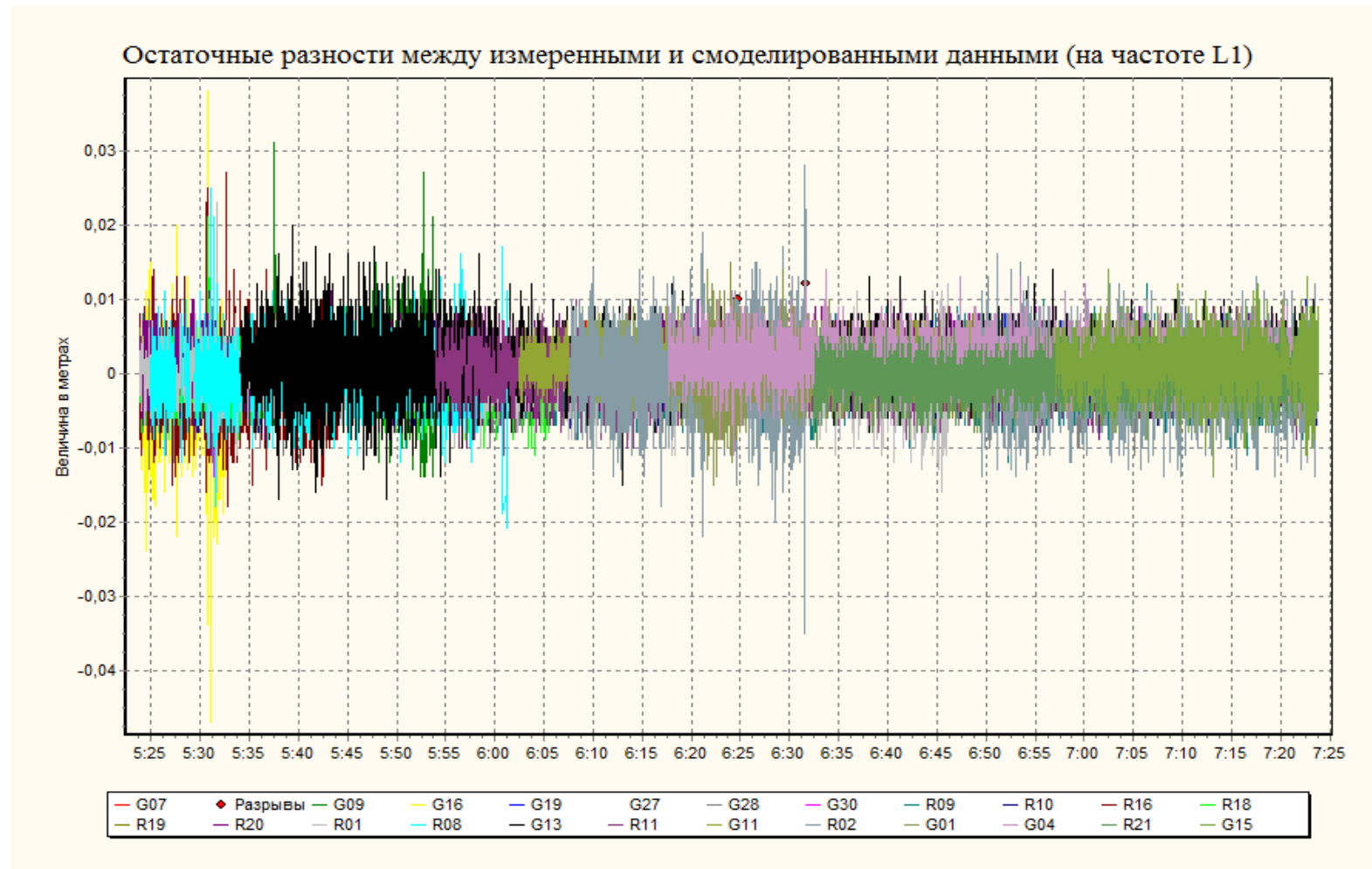


Рисунок Ж.9 – Остаточные разности (на частоте L1) на пункте SEMI 24 июня 2015 года

Остаточные разности между измеренными и смоделированными данными (на частоте L2)

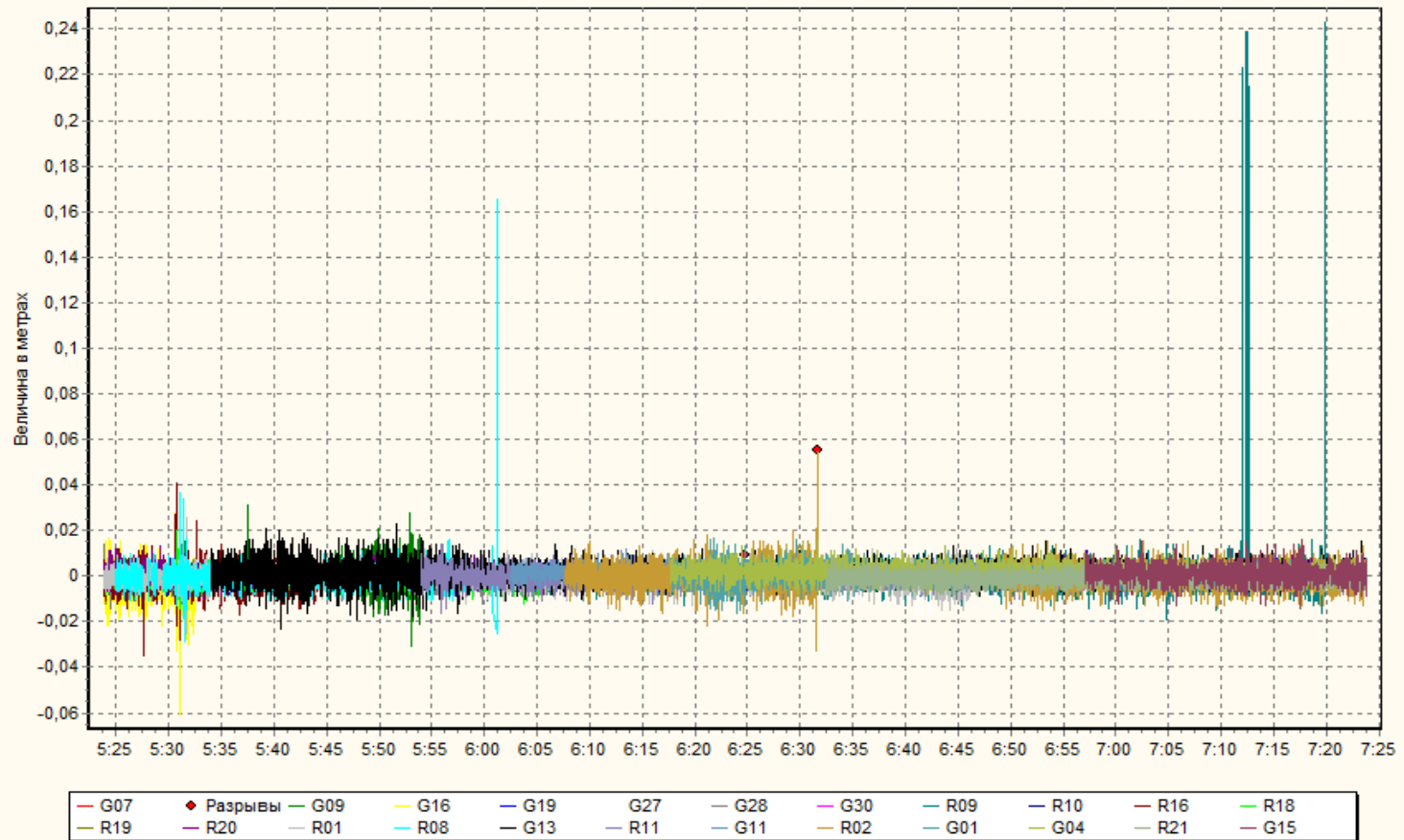


Рисунок Ж.10 – Остаточные разности (на частоте L2) на пункте SEMI 24 июня 2015 года