

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ НОВЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ФАЗОВЫХ СКАЧКОВ СТАТИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ

Введение

Точное определение местоположения (позиционирование) с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) широко применяется в таких приложениях, как геодезия, картография, межевание земли, кадастр, аэрофотосъемка, ГИС, точное земледелие, геодинамика и др. Все эти приложения предъявляют жесткие требования к точности определения координат – на сантиметровом и даже на миллиметровом уровне. Решение задач высокоточного позиционирования (определения местоположения) с указанной точностью невозможно без использования фазовых наблюдений [1 – 4]. Обработка фазовых наблюдений имеет ряд важных особенностей, которые заключаются в необходимости надежного устранения циклических фазовых скачков (т.н. “слипов”) и разрешения фазовой неоднозначности (РФН) [1, 2, 5].

В настоящей работе описываются результаты многолетних разработок, исследований и тестирования (экспериментальной верификации) новых эффективных методов и алгоритмов решения задач определения потерь счета циклов в одночастотных/двухчастотных фазовых ГНСС-наблюдениях и их исправления на этапе послесеансной предварительной обработки и анализа наблюдений.

Сложность проблемы восстановления непрерывности фазовых наблюдений подтверждается постоянным поиском новых более эффективных и более надежных методов и приемов обработки. Существует достаточно обширный список научной и технической литературы, посвященной исследованию этой проблемы. Так, по данной проблеме могут быть выделены работы [6 – 9] и ряд других. В этих работах предложены не только методы решения задачи применительно к конкретным условиям, но также и сравнение характеристик и особенностей других методов, уже известных ранее. Можно рассмотреть основные известные подходы и методы определения (обнаружение, идентификация и оценка) и устранение (исправление) фазовых скачков, которые широко используются в практике обработки ГНСС-наблюдений. Большинство подходов подразумевает формирование и последовательную обработку (с многочисленными разновидностями) линейных комбинаций (ЛК) наблюдений, так или иначе чувствительных к появлению скачков. Далее разработчики и исследователи применяют различные сглаживающие и “дифференцирующие” функции для этих ЛК для целей обнаружения и оценки скачков. Эффективность используемых в настоящее время методов обработки зависит от характеристик наблюдений, вида и частоты следования фазовых скачков, количества пропусков наблюдений, темпа данных, уровня шумов и др.

Как показано в работах [10 – 13], известные методы, как правило, не являются универсальными, имеют ограничения применимости в различных режимах и сложных условиях выполнения наблюдений. Выполненный анализ основных известных подходов показывает, что методы, алгоритмы и программное обеспечение обнаружения, оценки (фиксации) и устранения фазовых скачков должны удовлетворять следующим общим требованиям:

- программное обеспечение должно выполнять обработку данных отдельных ГНСС станций (приемников), также как и выполнять аналогичную обработку традиционных однарных и двойных разностей наблюдений “станция-станция”, “спутник-спутник”;
- входные данные – RINEX-файлы двухчастотных или одночастотных “сырых” ГНСС-наблюдений; программное обеспечение предварительной обработки должно выполнять обработку данных стандартного ряда темпов их регистрации 1/30 – 1 Гц;
- в ходе обработки должны быть выполнены обнаружение, оценка и коррекция скачков

наблюдений диапазонов частот ГНСС–сигналов L_1 и L_2 (или только L_1), которые были получены в статическом и в кинематическом "stop&go" режимах геодезической съемки, для каждой радиолинии (трассы) "спутник – приемник" отдельно.

С учетом указанных условий автором предложен новый универсальный подход, который базируется на результатах анализа и результатах многочисленных экспериментальных исследований и прошел успешную апробацию [13, 14]. Предложенный метод и алгоритмы решения задачи восстановления непрерывности фазовых наблюдений используют не только набор новых математических приемов обработки, но также и известные проверенные практикой процедуры. Для исключения фазовых циклических (и полуциклических) скачков одночастотных и двухчастотных ГНСС–наблюдений предлагаемый подход реализует интервальную итерационную процедуру обнаружения и оценки (фиксации) скачков одинарных разностей фаз между парами спутников с последующей их идентификацией на отдельных трассах "спутники – приемник". Последующая идентификация фазовых скачков на отдельных трассах "спутники – приемник" выполняется по результатам анализа скачков во всех возможных наборах линейных комбинаций фазовых наблюдений (одинарных разностях фаз между спутниками). После восстановления непрерывности L_1 наблюдений подобная обработка применяется и к линейным так называемым "безгеометрическим" комбинациям ($L_1 - L_2$) для обнаружения и устранения скачков в L_2 -наблюдениях.

Этот метод, как показали исследования, особенно эффективен для обработки статических наблюдений, а его модификация позволяет решить задачу восстановления непрерывности и кинематических фазовых наблюдений. Для обработки разреженных наблюдений (темпл данных – $1/5 - 1/30$ Гц) перманентных референсных IGS/EPN ГНСС станций предложено использовать все возможные двойные разности наблюдений с целью исключить вариации часов спутников в увеличенных интервалах между эпохами и увеличить надежность обнаружения и точность оценки скачков фаз [12]. Адаптация предложенного метода и алгоритмов для совместной обработки фазовых ГНСС (EGPS/ГЛОНАСС/EGNOS/ Galileo/Compass) наблюдений ввиду их идентичности не представляет принципиальных затруднений. В частности, данный метод был успешно протестирован на реальных измерениях EGNOS и ГЛОНАСС. Алгоритмы устранения фазовых скачков реализованы в программном MATLAB-комплексе «ОСТАВА_PPA» предварительной обработки и анализа ГНСС–наблюдений [14].

Тестирование предложенного метода и реализующих его алгоритмов позволило определить и ограничения их применимости. Это касается допустимых интервалов пропусков наблюдений, уровня шумов и т.д. и оптимальных параметров настройки процедур обработки для каждого типа наблюдений. Однако главное ограничение рассматриваемого метода заключается в снижении надежности обнаружения и фиксации скачков наблюдений, которые выполнялись в сложных условиях затенений и ограничений радиовидимости, особенно в условиях городских застроек, высотных зданий и др. Это приводит к частым разрывам слежения и появления кратковременных (до $5 - 30$ с) пропусков и даже полной потери наблюдений. Из-за этого происходит дробление интервалов наблюдений на отдельные участки, что на последующих этапах (РФН и позиционирования) приводит к уменьшению вероятности отыскания правильного целочисленного фазового решения задачи РФН и, соответственно, к аномальным решениям задачи определения координат.

Расширить возможности и повысить надежность устранения фазовых скачков одночастотных и двухчастотных кинематических наблюдений в сложных условиях позволяет применение другого более эффективного и надёжного альтернативного метода восстановления непрерывности фазовых наблюдений (обнаружения, оценки и устранения дискретных фазовых скачков), разработанного для условий полной или частичной кратковременной потери наблюдений, позволяющего в значительной степени парировать воздействие дробления интервалов наблюдений на отдельные участки на качество решения задачи позиционирования. Описанный альтернативный метод устранения фазовых скачков (детально изложен в работах [15, 16]) основан на использовании приращений наблюдений по времени и специальной про-

цедуры совместного МНК–оценивания совокупности континуальных (приращений координат и расхождений часов) и дискретных параметров (циклических фазовых скачков). Оценивание циклических фазовых скачков осуществляется прямым перебором в предварительно определенной области поиска по аналогии с тем, как выполняется оценивание дискретных параметров в процедурах РФН. Тестирование предложенных методов и алгоритмов проводилась с использованием реальных статических и кинематических ГНСС наблюдений, полученных в рамках совместного инновационного проекта ГАО НАНУ и ХНУРЭ в 2007 – 2010 гг., а также GPS–наблюдений, выполненных на подвижных носителях (вертолет, самолет) при проведении аэрофотосъемок.

Цель данной статьи – описание и обобщение результатов создания и тестирования (верификации) новых методов и алгоритмов надежного решения задачи обнаружения, оценки и устранения фазовых скачков статических и кинематических ГНСС–наблюдений, а также условий их эффективного практического применения.

Концепция решения задачи обнаружения и устранения скачков фазовых наблюдений

Разработанная концепция предполагает использование наблюдений отдельной ГНСС–станции/приемника (темп данных $1 - 1/5 \Gamma_{ij}$) и выполняет решение задачи коррекции фазовых циклических скачков в несколько этапов.

На предварительном этапе после преобразования данных из формата RINEX в удобную для дальнейшей обработки структуру реализуются стандартные навигационные вычисления с использованием кодовых наблюдений. Затем выполняется интерполяция всех наблюдений (кодовых, фазовых, доплеровских) на целые секунды ГНСС путем вычисления производной псевдоскорости, если в составе RINEX–файле «сырых» наблюдений отсутствовали доплеровские наблюдения. На предварительном этапе также выполняется первое редактирование выборок наблюдений (по углу места и длительности пропусков наблюдений).

Первый этап обработки базируется на следующем эмпирическом принципе:

Наиболее удовлетворительной функцией для обнаружения и оценки (фиксации) фазового скачка в какой либо точке этой функции является функция «без динамики», либо функция, в которой с высокой точностью «динамика» скомпенсирована каким-либо образом, например, с использованием дополнительной информации. Если уровень аддитивных шумов и коррелированной помехи (многолучевость и др. источники) заметно ниже величины искомого скачка, то, взяв первые разности по времени (приращения) от такой функции, можно достаточно просто обнаружить, оценить и устранить все одиночные либо множественные (последовательные) скачки, если они идентифицированы по принадлежности к наблюдениям диапазонов навигационных сигналов L_1 или L_2 . Важно в этом случае, что бреши (пропуски наблюдений) не влияют на качество определения (обнаружения и оценки) скачков.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что для целей определения и устранения фазовых циклических скачков вполне пригодны одинарные разности фазовых наблюдений «спутник – спутник» $[(L_1 - L_1)_{ij}, (L_2 - L_2)_{ij}, (L_{wL} - L_{wL})_{ij}, (L_1 - L_2)_i, (L_1 - L_2)_j]$, т.к. в этих линейных комбинациях устраняются погрешности часов приемника, а шумы бортовых атомных часов спутников не превышают $\sim(5 - 7)$ см. При формировании таких разностей важна точная временная привязка наблюдений (см. предварительный этап обработки) из-за достаточно высокой скорости изменения обрабатываемых параметров.

Главная задача заключается в корректном способе исключения «динамики» обрабатываемых функций в условиях пропусков наблюдений, во многих случаях – протяженных. Обработка начинается с определения участков видимости референчных спутников, совместно покрывающих весь интервал наблюдений. На каждом участке формируются и обрабатываются все указанные разностные ЛК наблюдений каждого из спутников относительно выбранного референчного. В результате интервальной итерационной обработки обнаруживаются и оцениваются скачки одинарных разностей «спутник-спутник» наблюдений L_1 для каждой пары спутников. Далее производится «поточечный» анализ скачков для всего участка

наблюдений. При этом используется принцип трех совпадений из m разностей ($m \geq 4$; $(m+1)$ – количество наблюдаемых спутников в анализируемый момент). Если в какой-либо момент времени в трех разностях фаз (ЛК) из m комбинаций скачки отсутствуют, то с высокой вероятностью в этот момент они отсутствуют в наблюдениях фазы на всех четырех трассах «спутники – ГНСС-приемник». Если же в каких-либо трех ЛК из m обнаружены и оценены скачки одной и той же величины, то с высокой вероятностью принимается решение о наличии скачка в этот момент в наблюдениях референчного спутника. В результате этого анализа формируются оценки скачков отдельно для каждой трассы (« i -й спутник – приемник» и « j -й спутник – приемник»). Такой подход может быть успешно применен как к одинарным разностям («станция – станция»), так и к двойным разностям фазовых наблюдений.

После полного устранения L_1 фазовых скачков, в случае двухчастотных наблюдений подобная обработка осуществляется применительно к «безгеометрической» ЛК (L_1-L_2) отдельно для каждой трассы «спутник – приемник». В результате оцениваются и исключаются фазовые скачки наблюдений и диапазона L_2 .

Важная отличительная особенность и новизна предлагаемого подхода состоят в способе обработки тех или других линейных комбинаций наблюдений, в частности, речь идет о прямых одночастотных одинарных разностей «спутник – спутник» и о двухчастотных «безгеометрических» ЛК (L_1-L_2). В ходе вычислений используется только обрабатываемая функция (ЛК) и ее приращения по времени (аналог доплеровских наблюдений). Эти приращения сглаживаются (с использованием кубических сплайнов) с одновременным устранением всех выбросов (эффекты скачков, пропусков наблюдений, аномальных измерений) и последующей интерполяцией сглаживающей функции на все пропущенные эпохи. Затем формируется разность между начальной функцией и проинтегрированной по времени «бесскачковой» сглаживающей приращения функцией. Полученная новая остаточная функция после одной-двух итераций сохраняет начальные скачки и становится близкой к ступенчатой (при наличии скачков) с исключенными эффектами влияния пропусков наблюдений. Применение одинарных приращений по времени к такой новой функции позволяет (при шумовом уровне, который не превышает выбранного порога – доли длины волны фазовых наблюдений) достаточно просто обнаружить и точно зафиксировать (например, оценить целое число длин волн в скачке) все скачки. На рис. 1 приведена иллюстрация разработанного способа оценки и устранения фазовых скачков в виде последовательности действий. Надежность обнаружения и оценки фазовых скачков зависит от того, насколько точно возможно выполнить аппроксимацию приращений по времени исходной функции. Это зависит от ряда факторов: соответствия динамики обрабатываемой функции темпу съема наблюдений, протяженности пропусков наблюдений, их шумового уровня, частоты возникновения пропусков и скачков.

Испытания с использованием статических наблюдений, выполненных в различных условиях, доказали работоспособность и эффективность предложенного метода по сравнению с известными зарубежными аналогами. Программное обеспечение, построенное на основе этого метода, позволяет выполнять успешное устранение фазовых циклических и полумоноциклических скачков, включая начальные и конечные участки выборок наблюдений с низкими углами места, и в условиях возникновения непрерывных скачков и пропусков наблюдений без использования дополнительной информации.

Описанный метод обработки имеет заметные преимущества перед аналогами [6 – 9]. Во-первых, формирование приращений начальной функции значительно уменьшает ее динамику и соответственно точность процесса аппроксимации приращений по сравнению с прямым сглаживанием начальной функции. Во-вторых, после завершения повторяющейся процедуры компенсации начальной динамики исходной функции для обнаружения и фиксации всех скачков используются только одинарные приращения. Дополнительные сложные и не всегда надежные процедуры для разделения скачков не требуются. В-третьих, технология универсальна, применима и к одночастотным и к двухчастотным статическим наблюдениям.

Повышение надежности предложенного метода может быть достигнуто за счет его совместного использования с другими методами и использования дополнительной информации

(доплеровские наблюдения, бортовые эфемериды спутников, «кооперативная» обработка пропущенных наблюдений для части спутников рабочего созвездия и т.д.). В обеспечение этого разработаны вспомогательные методы увеличения надежности, которые также протестированы с использованием наблюдений, полученных в режиме кинематических измерений. Адаптация предложенного метода и алгоритмов для совместной обработки фазовых наблюдений нескольких ГНСС (GPS/ГЛОНАСС/EGNOS/Galileo/Compass), как показали эксперименты с наблюдениями ГЛОНАСС и EGNOS, не представляет принципиальных трудностей.

Ниже представлены иллюстрации (рис. 2, 3) результатов определения и коррекции циклических фазовых скачков с использованием предложенных метода и алгоритмов применительно к наблюдениям приемника NovAtel OEM4-G2 [11, 14] для GPS спутников SV9 ($\beta=5^\circ - 10^\circ$) – рис. 2, SV26 ($\beta=5^\circ - 23^\circ$) – рис. 3. На рисунках все представленные значения функций даны в метрах, время – в секундах. Последовательность рисунков следующая. На рис. 2, а – е, рис. 3, а – е представлены двухчастотные (L_1 и L_2) ЛК фазовых и кодовых наблюдений, чувствительных к фазовым скачкам. Рис. 2, а, б, в, рис. 3 а, б, в соответственно показывают эти ЛК *перед* устранением фазовых скачков, рис. 2, г, д, е, рис. 3, г, д, е – *после* устранения фазовых скачков. На рис. 2, а, б, рис. 3, а, б (*до обработки*), рис. 2, г, д, рис. 3, г, д (*после обработки*) даются линейные комбинации ($L_1 - L_2$) (рис. 2, а, г, рис. 3, а, г и их приращения по времени – рис. 2, б, д, рис. 3, б, д).

Эти рисунки ясно показывают фазовые скачки (рис. 2, а, рис. 3, а), их появление в приращениях по времени (рис. 2, б, рис. 3, б) и шумы фазовых наблюдений (рис. 2, д, рис. 3, д). Рис. 2, а, б, в, рис. 3, а, б, в (*до обработки*), рис. 2, г, д, е, рис. 3, г, д, е (*после обработки*) иллюстрирует «безионосферную» и «безгеометрическую» линейные комбинации, функцию четырех наблюдений F . Эта уникальная ЛК чувствительна к разности L_1 и L_2 фазовых циклических скачков с длиной волны $\lambda_{WL} = 86,2$ см. Линейная комбинация F является комплиментарной к разности ($L_1 - L_2$) в случае возникновения двойных фазовых скачков (на одну и ту же эпоху), включая критические комбинации циклических скачков, когда $\Delta N_1 \lambda_1 - \Delta N_2 \lambda_2 \approx 0$. Здесь – $\Delta N_1, \Delta N_2$ – циклические скачки, а λ_1, λ_2 – длины волн несущих навигационных сигналов L_1 и L_2 соответственно [10, 11, 13].

Тестирование и представленные результаты демонстрируют успешное восстановление непрерывности статических фазовых наблюдений (с темпом $1 - 1/5$ Гц) отдельной станции (приемника) с использованием разработанного подхода. Созданное программное обеспечение позволяет обнаруживать, определять и устранять фазовые циклические скачки даже на сложных участках (низкие углы места $\beta=5^\circ - 10^\circ$) и при повышенном уровне шумовых погрешностей, с многочисленными слипами и протяженными пропусками наблюдений.

Предложенный подход был также применен для реализации алгоритмов и программных модулей обработки разреженных статических наблюдений (типовой темп $1/30$ Гц) и кинематических наблюдений (темп 1 Гц и выше). Эти алгоритмы подробно описаны ниже.

В ходе обработки разреженных наблюдений перманентных референционных IGS/EPN станций используются все возможные двойные разности наблюдений с целью исключить вариации часов спутников в увеличенных интервалах между эпохами и увеличить надежность обнаружения и точность оценки скачков фаз [12].

При обработке наблюдений с высокой динамикой перед использованием основного метода обнаружения, оценки и устранения фазовых скачков применяется предварительная процедура, позволяющая оценить и компенсировать динамику наблюдений на трассах «спутники – ровер». Для этой цели выполняется точная оценка приращений координат и вариаций часов приемника с использованием приращений фаз на соседних эпохах наблюдений с параллельной отбраковкой возможных фазовых скачков и выбросов.

Описанный подход и алгоритмы обработки реализованы в программном MATLAB-комплексе «OSTAVA_PPA» для обработки и анализа ГНСС-наблюдений [14].

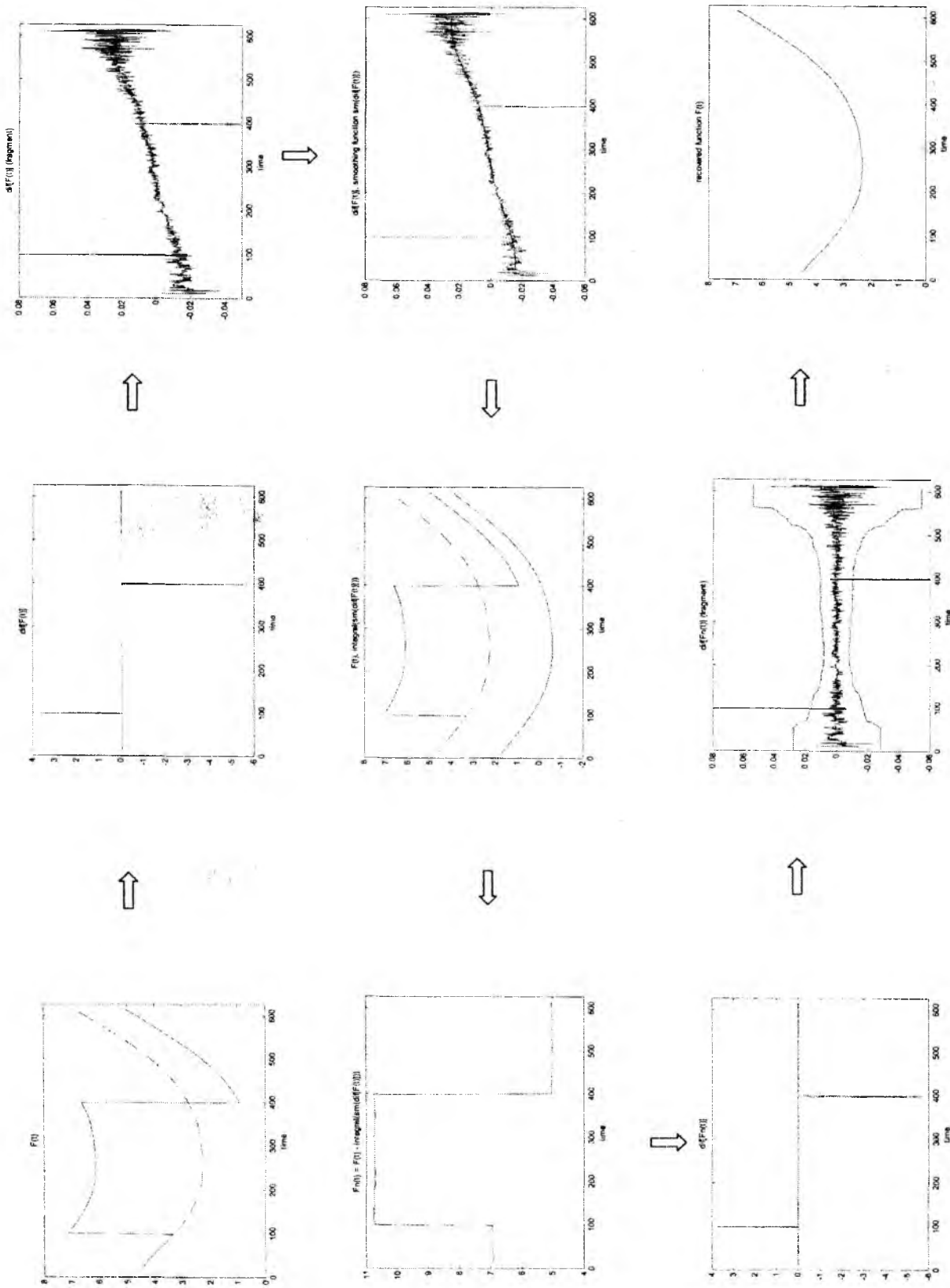
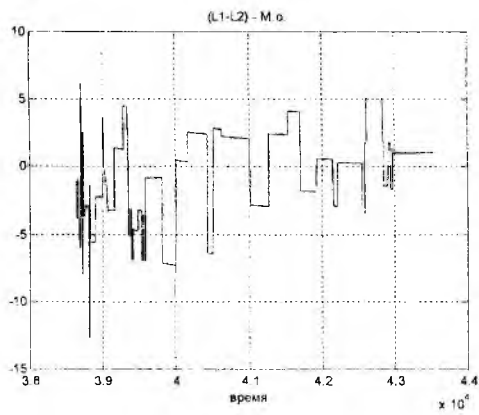
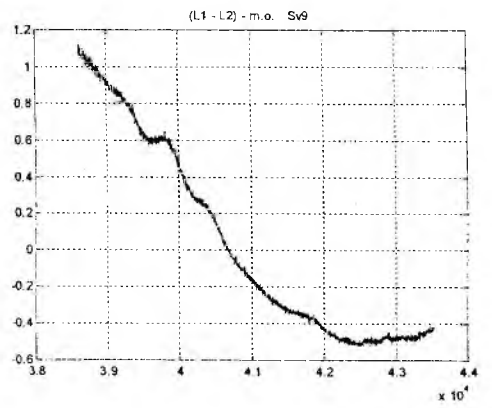


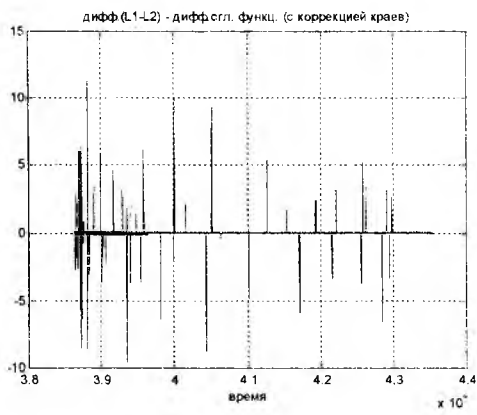
Рис. 1



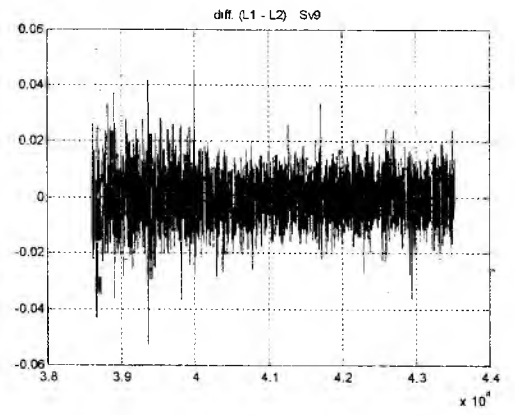
до обработки
а



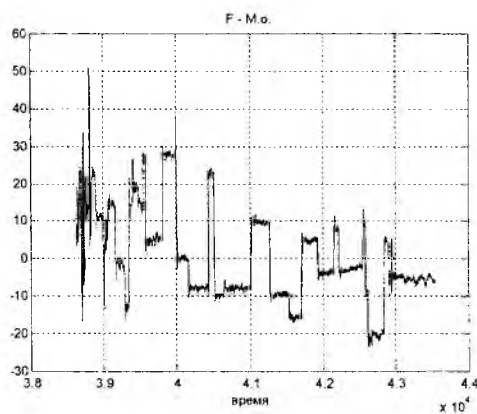
после обработки
з



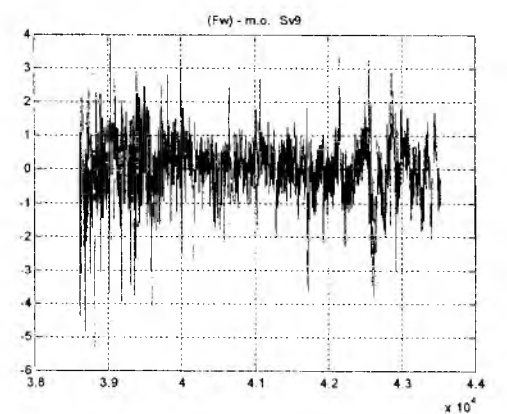
до обработки
б



после обработки
д

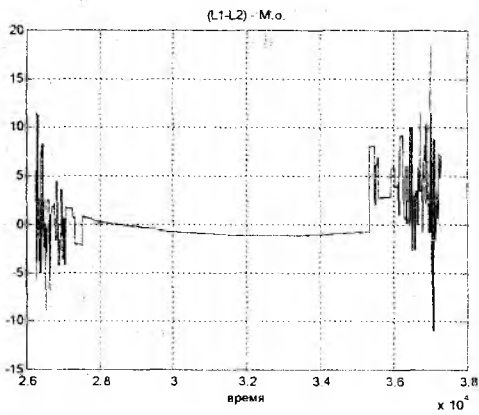


до обработки
в

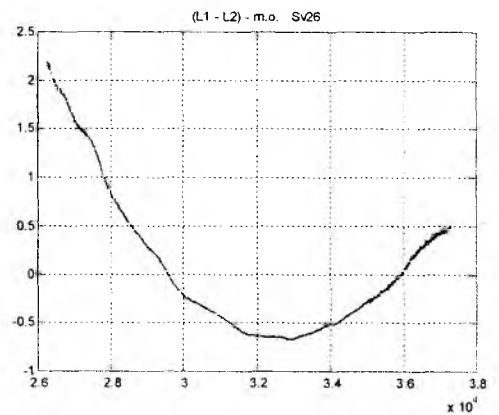


после обработки
е

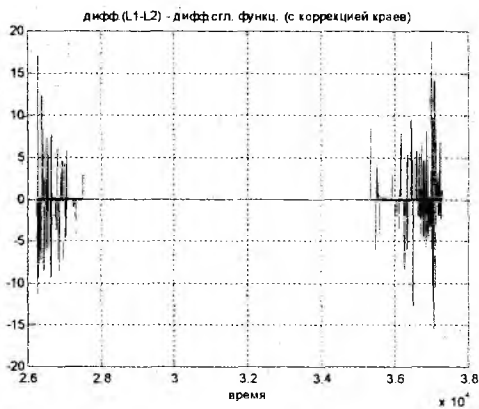
Рис. 2



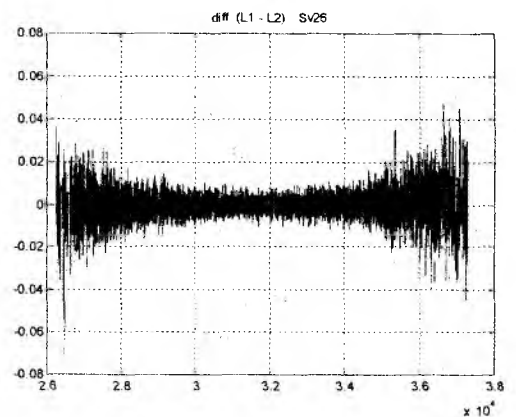
до обработки
а



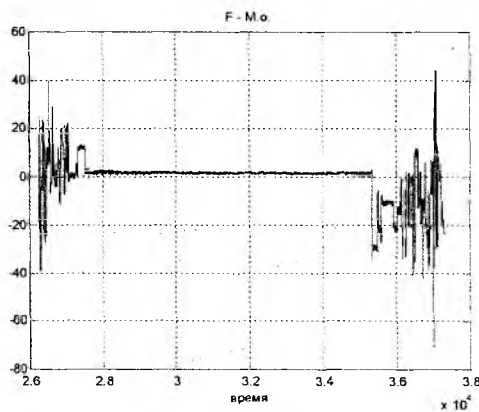
после обработки
б



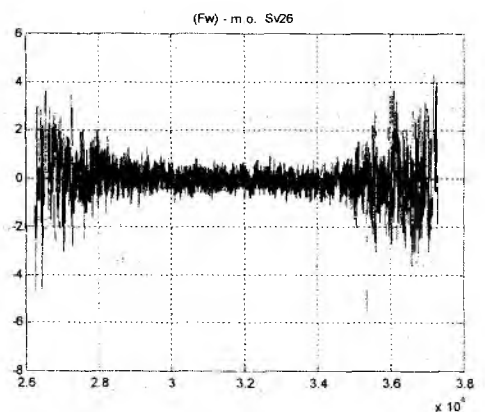
до обработки
в



после обработки
г



до обработки
д



после обработки
е

Рис. 3

Особенности и ограничения точной коррекции фазовых скачков

Тестирование предложенного метода позволило определить ограничения его применимости. Это касается допустимых интервалов пропусков наблюдений, уровня шумов и оптимальных параметров настройки процедур обработки для каждого типа наблюдений.

Одночастотные одинарные разности фазовых наблюдений дают возможность обнаруживать и оценивать фазовые скачки наблюдений отдельной станции, однако применение

этой линейной комбинации имеет ограничение. Величина допустимого интервала пропуска наблюдений, при котором гарантируется надежное выявление скачка, для одинарных разностей зависит от различных факторов (ионосферных вариаций, шумовых характеристик часов спутников и др.). Как показали экспериментальные исследования, для темпа обрабатываемых данных 1 Гц допустимые интервалы пропусков наблюдений не должны превышать $50 - 70$ отсчетов. В случае превышения допустимых интервалов необходимо отделить интервалы наблюдений спутника и выполнять обработку для каждого участка отдельно. Это главное ограничение по использованию предложенных алгоритмов обработки. Кроме того, проблемными для обработки являются участки (как правило, при наблюдениях на «низких» углах места) с чередующимися пропусками. Особенно это критично для краевых участков обрабатываемой выборки. Для повышения надежности обработки рекомендуется делать предыдущее редактирование наблюдений – выделять непрерывные (с допустимыми интервалами пропусков) участки, отсекают "плохие" краевые участки.

Наилучшим критерием тестирования качества обработки наблюдений в части исправления циклических фазовых скачков является использование двойных разностей наблюдений (между парами станций и парами спутников), так как эти линейные комбинации имеют меньшую динамику и не зависят от уходов часов приемников и спутников. Использование двойных разностей фазовых наблюдений позволяет реализовать надежную обработку даже сильно разреженных ($1/30 \text{ Гц}$) наблюдений перманентных станций (см. ниже). Для реализации такой обработки необходимо использование наблюдений нескольких (сети) станций.

Однако главное ограничение рассматриваемого метода заключается в снижении надежности обнаружения и фиксации скачков наблюдений, которые выполнялись в сложных условиях затенений и ограничений радиовидимости, особенно в условиях городских застроек, высотных зданий и др. Это приводит к частым разрывам слежения и появлению кратковременных (до $5 - 30 \text{ с}$) пропусков и даже полной потери наблюдений. Из-за этого происходит дробление интервалов наблюдений на отдельные участки, на которых фазовые скачки можно устранить.

Расширить возможности и повысить надежность устранения фазовых скачков одночастотных и двухчастотных кинематических наблюдений в сложных условиях позволяет применение другого более эффективного и надёжного метода восстановления непрерывности фазовых наблюдений (обнаружения, оценки и устранения дискретных фазовых скачков) для условий полной или частичной кратковременной потери наблюдений. Кратко описанный ниже альтернативный метод устранения фазовых скачков [15, 16] основан на использовании приращений наблюдений по времени и специальной процедуры совместного МНК-оценивания совокупности континуальных (приращений координат и расхождений часов) и дискретных параметров (циклических фазовых скачков). Циклические фазовые скачки оцениваются прямым перебором в предварительно определённой области поиска по аналогии, так же, как оцениваются дискретные параметры в процедурах РФН.

Обнаружение, оценка, идентификация и устранение фазовых скачков разреженных наблюдений

Как показали исследования [12], обработку разреженных наблюдений (темп данных $1/30 - 1/10 \text{ Гц}$ – для перманентных референчных IGS/EPN станций) с использованием разработанного метода выявления и исключения фазовых скачков необходимо выполнять с использованием двойных разностей фазовых наблюдений сети станций. В таблице представлены результаты определения предельных значений интервалов пропущенных наблюдений, при которых возникают ошибочные решения и снижается надежность устранения фазовых прыжков. Кратко описана модификация предложенных выше метода и алгоритмов обработки применительно к разреженным наблюдениям и процедура идентификации и исключения фазовых скачков на отдельных радиолиниях «спутники – станции».

В ходе выполненных исследований было выявлено, что компенсация в одинарных разностях фазовых наблюдений (между спутниками) расчетных расстояний (геометрическая составляющая), частотно-временных уходов спутниковых часов и тропосферных задержек дает возможность визуализировать и оценить уровень флуктуаций фаз опорных генераторов спутниковых часов. Было установлено, что эти флуктуации ограничивают допустимое число пропущенных эпох измерений. При темпе наблюдений $1/30$ Гц пропуск всего одной точки наблюдений приводит к пропуску 60 с наблюдений. Если пропуск наблюдений находится на участке с большой крутизной, то интерполировать пропущенные точки с необходимой точностью сложно. Проявить скачок фазы в один-два цикла при таких условиях возможно только при совместной обработке одночастотных наблюдений нескольких перманентных станций. Учет динамики движения спутников, уходов спутниковых часов и тропосферной задержки не дают выигрыша в надежности выявления и оценки фазовых скачков. Основным фактором, который влияет на качество обработки одинарных разностей фазовых наблюдений, являются флуктуации бортовых часов спутников. В таблице приведены допустимые интервалы пропусков наблюдений для исследованных линейных комбинаций, обеспечивающих вероятность обнаружения и оценки фазового циклического скачка $\sim 99\%$ [12].

Линейная комбинация	Требует двухчастотных наблюдений	Используемые для обработки наблюдения	Интервал допустимых пропусков наблюдений на краю выборки, с	Интервал допустимых пропусков наблюдений в центре выборки, с
Одинарные одночастотные ($L_1-L_1; L_2-L_2$) разности	—	одиночная станция	без пропусков вероятность принятия правильного решения (обнаружения и оценки скачка) $\sim 50\%$	
Одинарные (между спутниками) Wide-Lane разности	Да	одиночная станция	120 – 150	180 – 210
Одинарные ($(L_1-L_1)-(L_2-L_2)$) разности (между спутниками)	Да	одиночная станция	120 – 150	180 – 210
Двойные разности (между станциями и спутниками)	Нет	несколько (сеть) станций	120 – 150	210 – 270

В результате исследований получены следующие выводы:

- при обработке одинарных разностей фаз между навигационными спутниками одной перманентной станции и темпе информации $1/30$ Гц невозможно гарантировать надежную оценку фазового циклического прыжка из-за погрешности интерполяции флуктуаций спутниковых часов даже при отсутствии пропусков наблюдений;

- на этапе подготовки данных к обработке линейных комбинаций наблюдений и при первичном редактировании данных необходимо определить участки, на которых продолжительность пропусков наблюдений превышает рекомендованные величины. Участки наблюдений, которые содержат пропуски, и эти пропуски превышают допустимые величины, должны обрабатываться отдельно;

- наиболее эффективна обработка разреженных наблюдений не одной станцией, а их совместная (сетевая) обработка. При этом возможна надежная обработка как одночастотных, так и двухчастотных наблюдений с темпом данных $1/30$ Гц. Для упрощения логики идентификации перманентной станции и радиолинии, где произошел фазовый скачок, рекомендуется совместная обработка наблюдений перманентных станций с использованием наблюдений

хотя бы одной станции с темпом данных $1 - 1/5 \text{ Гц}$. После устранения скачков фазовых наблюдений станции с темпом данных 1 Гц двойные разности L_1 -наблюдений перманентных станций относительно этой станции позволяют легко обнаружить, оценить и идентифицировать скачки в наблюдениях перманентных станций;

- после восстановления непрерывности наблюдений на частоте L_1 , линейная комбинация (L_1-L_2) дает возможность надежно обнаружить и устранить скачки в L_2 -наблюдениях на каждой радиолинии отдельно. При реализации данных рекомендаций возможно увеличение допустимой продолжительности пропусков наблюдений, при которых обеспечивается надежная оценка фазовых скачков (вероятность правильного выявления 99 %) с 30 до 120 – 150 с;

- при обработке двухчастотных наблюдений отдельной перманентной станции с темпом информации $1/30 \text{ Гц}$ восстановление непрерывности фазовых наблюдений возможно с использованием двух линейных комбинаций (например, Wide-Lane и (L_1-L_2) [1]). После обнаружения и идентификации фазовых циклических скачков в каждой из линейных комбинаций производится совместная обработка полученных данных для идентификации трасс («спутник – приемник») наблюдений, в которых произошли фазовые скачки.

Модифицированная процедура обработки фазовых разреженных наблюдений сети перманентных референционных станций сводится к следующим действиям.

Исходная информация:

1) фазовые наблюдения L_1 должны быть поделены на участки непрерывности с учетом заранее оговоренных условий длительности пропусков, количества точек (без пропусков) по краям, общей длительности участка, количества точек между пропусками, общего количества точек на участке;

2) заранее должно быть осуществлено ранжирование (определение приоритетности) станций, исходя из количества наблюдений L_1 , при этом первая станция должна быть, по возможности, с наилучшими данными.

Рекомендуется вводить в состав сети станций в качестве первой – станцию, которая уже прошла полный пре-процессинг наблюдений с темпом $1 - 1/5 \text{ Гц}$.

Рекомендуемые критерии ранжирования станций по оценке качества наблюдений:

1) отсутствие пропусков эпох наблюдений – одновременно всех (C/A, P₂, L₁, L₂) наблюдений по всем спутникам (пропуски более одной эпохи); каждый такой пропуск образует новые сессии наблюдений;

2) отсутствие длительных (120 с и более) пропусков – участков наблюдений для каких-либо (одного или нескольких) спутников (не одновременно для всех) на углах места свыше 15° ;

3) минимальное число отбракованных наблюдений L_1, L_2 ;

4) минимальные потери L_1 наблюдений после деления на участки по сравнению с расчетной длительностью (по заданным ограничениям по углу места или по интервалу измерений для каждого спутника).

Обработка кинематических фазовых наблюдений

При обработке наблюдений, полученных в условиях высокой динамики (кинематическая съемка), когда темп наблюдений (обычно 1 Гц) не соответствует спектру процесса движения объекта, применять только описанные выше интерполяционные схемы невозможно. Это относится к геодезическим наблюдениям в движении.

Суть алгоритма предварительной обработки наблюдений с высокой динамикой заключается в точной оценке текущих изменений (приращений) координат движущегося объекта и формировании разностей измеренных фаз принятых навигационных сигналов и расчетных их значений, в которых динамика движения была бы практически исключена. Это позволяет воспользоваться ранее описанным интерполяционным методом обработки фазовых наблюдений для выявления, оценки и исключения фазовых скачков статических наблюдений.

Как показали исследования, точность оценки приращений координат движущегося объекта и уходов часов приемника достигает уровня 0,5 – 2 см. Это позволяет рассчитать и практически целиком устранить динамику изменения фазовой задержки (геометрия, уходы часов, тропосферная и ионосферная задержки) на отдельных радиополосах «спутник – приемник», визуализировать и анализировать кодовые и фазовые наблюдения по уровню многолучевости и шумов. Задача состоит в получении надежных оценок приращений координат и уходов часов роверного приемника. Приращение координат и времени можно проинтегрировать и с точностью до констант восстановить фазовые наблюдения и их ЛК, чтобы потом это использовать для обработки «квази-бездинамичных» фазовых наблюдений с целью выявления, оценки и починки скачков. Вторая задача состоит в выявлении моментов скачков в наблюдениях отдельных спутников из текущего рабочего созвездия в ходе решения навигационной задачи (по невязкам измеренных и расчетных значений наблюдений).

Таким образом, идея метода заключается в использовании наблюдений всех спутников в сопредельные моменты времени (где это возможно) сначала для оценки приращений координат объекта и затем – для устранения динамики объекта и спутников и последующей обработки полученных разностей фазовых наблюдений и предвычисленных значений для выявления и оценки (фиксации) скачков. Данная концепция объединяет в себе два подхода – оценку и компенсацию динамики движения объекта в наблюдениях и уже используемую интерполяционную схему обработки. Она может быть реализована также в итерационной схеме, когда после первой починки слайпов повторная оценка приращений координат «ровера» будет более надежной.

Ниже представлено описание решения поставленной задачи.

Положим, что «роверный» (мобильный) движущийся приемник (R – «rover») и базовая станция (BS – «base station») в общем случае производят двух- или одночастотные кодовые и фазовые наблюдения. Фазовые наблюдения неоднозначны и подвержены скачкам. Задача состоит в том, чтобы получить надежные оценки приращений координат и уходов часов «ровера» (или «ровера» относительно базовой станции BS при реализации дифференциального режима измерений). Полагаем, что предварительная обработка наблюдений BS уже выполнена, и в фазовых наблюдениях BS нет скачков. Приращения координат и времени можно проинтегрировать и с точностью до констант восстановить фазовые псевдодальности и их комбинации, чтобы затем это использовать для обработки «квази-бездинамичных» фазовых наблюдений с целью обнаружения, оценки и починки фазовых скачков. Параллельно необходимо решить задачу предварительного обнаружения моментов фазовых скачков в наблюдениях отдельных спутников из текущего рабочего созвездия в ходе решения навигационной задачи (по невязкам измеренных и расчетных наблюдений).

Таким образом, идея метода состоит в использовании наблюдений всех спутников в смежные моменты времени (где это возможно) вначале для оценки приращений координат объекта и затем – для устранения динамики объекта и спутников и последующей обработки полученных разностей фазовых наблюдений и предвычисленных значений для обнаружения и оценки фазовых скачков. В ходе решения можно использовать предварительно обработанные и кодовые наблюдения (их приращения) совместно с приращениями фаз с учетом весов этих сильно неравноточных наблюдений. Это позволит регуляризовать решение навигационной задачи (НЗ) и повысить надежность обнаружения выбросов приращений фазы, обусловленных скачками.

Полагаем, что как в наблюдениях «ровера», так и в наблюдениях базовой станции выделены участки наблюдений, на которых предполагается исключить фазовые скачки, кодовые псевдодальности непрерывны и вычищены от аномальных наблюдений, скачков часов, все наблюдения приведены к единой равнодискретной шкале времени ГНСС.

Рассмотрим уравнения наблюдений и их приращений (см. ниже), в которых опустим медленные аппаратные изменения (задержки в измерительных трактах), изменения из-за неточного знания фазовых характеристик (фазовых центров и вариаций фазовых диаграмм)

передающих и приемных антенн, wind-up-эффекты, релятивистские и геодинимические эффекты. Полагаем также, что в приращениях наблюдений практически уходят погрешности координатной привязки базовой станции.

Полагаем, что при обработке наблюдений движущегося «роверного» приемника могут использоваться дифференциальные коррекции (фазовые наблюдения) базовой (ых) станции (й), при этом фазовые наблюдения базовой станции не должны содержать фазовых скачков.

Здесь также полагаем, что из-за большего количества циклических скачков в наблюдениях на частоте L_2 (по сравнению с наблюдениями на частоте L_1) на данном этапе обработки будем использовать только наблюдения диапазона L_1 . Влияние медленно меняющихся погрешностей (эфемериды, ионосфера, тропосфера, медленные уходы часов спутников) на точность оценки приращений координат будет компенсироваться с использованием либо соответствующих моделей (допустимых для недифференциального режима интервалов формирования приращений наблюдений) либо с использованием дифференциального режима и тех же моделей. Обработка наблюдений диапазона L_2 (в части устранения фазовых скачков) должна проводиться по алгоритмам для статического режима наблюдений на основе использования «безгеометрических» разностей (L_1-L_2), как это было описано ранее.

Определение допустимых интервалов должно быть произведено путем расчетов с использованием моделей изменения эфемеридных погрешностей, тропосферной и ионосферной составляющих. Допустимый интервал должен быть таким, чтобы медленно меняющаяся суммарная компонента погрешности приращения фазы на этом интервале не превышала 2-3 см. Тогда будет возможно обнаружение, верная оценка и устранение циклических и даже полумоциклических скачков фазы.

При последующем анализе уравнений наблюдений и источников и составляющих погрешностей будем анализировать интервалы оценки приращений координат от 1 до 100 с.

Полагаем, что при формировании последовательных приращений фазовых наблюдений для смежных моментов t_{k+1} и t_k имеем на эти моменты созвездие из m спутников ($m > 4$) и для момента t_k имеем хотя бы грубые (абсолютные) значения координат и расхождений шкал времени роверного приемника (для базовой станции координаты известны с высокой точностью).

Приращения кодовых и фазовых наблюдений на частоте L_1 (с учетом изложенного) для роверного («r») приемника или базовой станции («bs»):

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta \hat{S}_c^j(t_{k+1}, t_k) &= \Delta \hat{R}^j(t_{k+1}, t_k) + \Delta \Delta_{\phi}^j(t_{k+1}, t_k) + \Delta \Delta_{\phi}^{GPS}(t_{k+1}, t_k) - \\ &- \Delta \Delta_{\phi}^{j, GPS}(t_{k+1}, t_k) + \Delta T^j(t_{k+1}, t_k) + \Delta \hat{I}^j(t_{k+1}, t_k) + \delta \Delta \hat{S}_{mf}^j(t_{k+1}, t_k); \\ \Delta \hat{L}^j(t_{k+1}, t_k) &= \Delta \hat{R}^j(t_{k+1}, t_k) + \Delta \Delta_{\phi}^j(t_{k+1}, t_k) + \Delta \Delta^{GPS}(t_{k+1}, t_k) - \\ &- \Delta \Delta_{\phi}^{j, GPS}(t_{k+1}, t_k) + \Delta T^j(t_{k+1}, t_k) - \Delta \hat{I}^j(t_{k+1}, t_k) + \xi_j \cdot \Delta N^j(t_{k+1}, t_k) \cdot \lambda^* + \\ &+ \delta \Delta L_{mf}^j(t_{k+1}, t_k), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta \hat{R}^j(t_{k+1}, t_k) = \hat{R}^j(t_{k+1}) - \hat{R}^j(t_k) = \sqrt{\underbrace{(x - \hat{X}^j)^2 + (y - \hat{Y}^j)^2 + (z - \hat{Z}^j)^2}_{I=t_{k+1}}} - \sqrt{\underbrace{(x - \hat{X}^j)^2 + (y - \hat{Y}^j)^2 + (z - \hat{Z}^j)^2}_{I=t_k}};$$

x, y, z – неизвестные координаты «ровера» (x_r, y_r, z_r) на моменты t_{k+1}, t_k или известные координаты базовой станции ($\hat{x}_{BS}, \hat{y}_{BS}, \hat{z}_{BS}$).

В системе уравнений (1) опущены составляющие погрешностей приращений дальностей («BS – j -й SV») из-за остаточных погрешностей привязки базовой станции они пренебрежимо малы; в то же время в уравнениях для базовых станций (BS) целесообразно использовать «шляпки» над x_{BS}, y_{BS}, z_{BS} , не забывая, что это не точные значения координат, а их оценки;

$\Delta\Delta_{\phi}^j, \Delta\Delta^{GPS}, \Delta\Delta^{iGPS}, \Delta T^j, \Delta I^j$ – приращения эфемеридных погрешностей, приращения уходов часов приемника (величина, подлежащая оценке), приращения уходов часов спутников (погрешность) приращения тропосферной и ионосферной погрешностей соответственно;

$\xi_j \cdot \Delta N^j(t_{k+1}, t_k) \cdot \lambda^*$ – величина циклического ($\lambda^* = \lambda_1$) или полуциклического ($\lambda^* = \lambda_{1/2}$) скачка фазы L_1 при его возникновении ($\xi_j = 1$), ($\xi_j = 0$ – скачок отсутствует);

$\delta\Delta S_{mf}^j, \delta\Delta L_{mf}^j$ – погрешности из-за шумов и многолучевости.

При совместной обработке фазовых и кодовых приращений можно принять соотношение весов: $P_{dL} = 100$, ($\sigma L \approx 1$ см); $P_S = 0,5 - 1$; ($\sigma S \approx 1 - 2$ м), размерность весов – (1/м). При последующей обработке весовые соотношения можно уточнить, но на данном этапе для решений данной конкретной задачи это не столь важно.

Теперь видоизменим и проанализируем выражение для $\Delta\dot{R}^j(t_{k+1}, t_k)$. Введем обозначения искомых величин приращений координат, опустив для простоты обозначение момента времени t :

$$\Delta x = \Delta x_{k+1} = x_{k+1} - x_k;$$

$$\Delta y = \Delta y_{k+1} = y_{k+1} - y_k;$$

$$\Delta z = \Delta z_{k+1} = z_{k+1} - z_k;$$

где индекс k – означает момент t_k , а индекс $(k+1)$ – момент t_{k+1} .

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta\dot{R}_{k+1}^j &= \Delta\dot{R}^j(t_{k+1}, t_k) = \\ &= \sqrt{[(\Delta x_{k+1} - \Delta\hat{X}_{k+1}^j) + (\hat{x}_k - \hat{X}_k^j)]^2 + [(\Delta y_{k+1} - \Delta\hat{Y}_{k+1}^j) + (\hat{y}_k - \hat{Y}_k^j)]^2 +} \\ &+ [(\Delta z_{k+1} - \Delta\hat{Z}_{k+1}^j) + (\hat{z}_k - \hat{Z}_k^j)]^2} + \frac{\partial\Delta\dot{R}^j}{\partial(x_k, y_k, z_k)} \cdot \delta \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Здесь введены приближенные оценки координат «ровер»/базовая станция.

Упростим еще раз последнее выражение:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{R}^j(t_{k+1}, t_k) &= \Delta\dot{R}^j = \\ &= \sqrt{[(\Delta x + (\hat{x}_R - \Delta\hat{X}_{R+1}^j)]^2 + [(\Delta y + (\hat{y}_R - \Delta\hat{Y}_{R+1}^j)]^2 + [(\Delta z + (\hat{z}_R - \Delta\hat{Z}_{R+1}^j)]^2} - \\ &- \sqrt{[\hat{x}_R - \Delta\hat{X}_{R+1}^j]^2 + [\hat{y}_R - \Delta\hat{Y}_{R+1}^j]^2 + [\hat{z}_R - \Delta\hat{Z}_{R+1}^j]^2} + \delta\Delta\dot{R}^j(\delta\hat{x}_k). \end{aligned} \quad (2)$$

Прежде чем приступить к анализу вариантов решения поставленной задачи оценки приращений координат и расхождения времени «роверного» приемника (или базовой станции) важно оценить возможность решения задачи с необходимым качеством, т.е. оценить погрешности и допустимые интервалы формирования и обработки приращений фазовых псевдодальностей.

Подразумевается, что требуемая точность оценки искомых приращений не должна быть хуже 9 см с учетом геометрического фактора (ГФ), который ограничивается типовыми значениями 2 – 4. Таким образом, суммарная погрешность определения приращений фаз не должна превышать 2 – 5 см. Это важно еще и для решения задачи надежного обнаружения «слипов» (до $0,5 \lambda$) в приращениях фазы (фазовых псевдодальностей).

Очевидно, что точность приращений фазы при фиксированных флуктуационной и многолучевой составляющих погрешности будет зависеть от изменения медленно меняющихся составляющих:

эфемеридной;

ухода часов спутников;

абсолютных определений координат $\delta \vec{x}(t_k)$ в опорный момент t_k ;

ионосферной;

тропосферной.

Рассмотрим эфемеридную составляющую погрешности и составляющую погрешности, обусловленную неточным определением абсолютных координат в начальный момент t_k .

Исходя из общих правил взятия дифференциала от выражения (2) можно получить соотношения для оценки рассматриваемых составляющих погрешностей приращений дальностей.

Нетрудно показать, что эфемеридная составляющая и составляющая из-за погрешности координат в момент t_k имеют идентичные (с точностью до знака) выражения для оценки погрешности приращений, т.е.:

$$\begin{cases} \delta \Delta \dot{R}^j(\delta \vec{x}_{\text{эф}}^j) \approx [\hat{a}^j(t_{k+1}) - \hat{a}^j(t_k)]^T \cdot \delta \vec{x}_{\text{эф}}^j; \\ \delta \Delta \dot{R}^j(\delta \vec{x}(t_k)) \approx -[\hat{a}^j(t_{k+1}) - \hat{a}^j(t_k)]^T \cdot \delta \vec{x}(t_k). \end{cases}$$

Здесь $\delta \vec{x}_{\text{эф}}^j$ – вектор погрешностей эфемерид.

Предполагаем, что в орбитальной (связанной с местоположением спутника) системе координат j -го SV за интервал времени $\Delta t_{k+1} = (t_{k+1} - t_k)$ вектор $\delta \vec{x}_{\text{эф}}^j$ практически не изменяется (медленно меняющаяся погрешность) с учетом неизменности преобразования из орбитальной системы координат (СК) в ГСК (Гринвичская система координат) для почти круговой орбиты, но изменяется положение спутника и, соответственно, проекция $\delta \vec{x}_{\text{эф}}^j$ на направление «приемник – j -й SV» будет изменяться с учетом местоположения приемника на поверхности Земли;

$\delta \vec{x}(t_k)$ – вектор погрешностей координат приемника в момент t_k ;

$\hat{a}^j(t_k), \hat{a}^j(t_{k+1})$ – векторы направляющих косинусов в ГСК на трассе « j -й SV – приемник».

Рассмотрим плоскую (двумерную) модель (рис. 4) для оценки максимальной эфемеридной погрешности с учетом, что орбиты спутников GPS почти круговые, радиус Земли $R_3 \approx 6400$ км, высота орбит $H \approx 20000$ км.

Легко показать, что $\delta \dot{R}_{\Delta\phi}^j \approx \Delta_{\Delta\phi} \cdot [\gamma_{k+1} - \gamma_k] = \Delta_{\Delta\phi} \cdot \Delta\gamma(\phi)$, где $\Delta\gamma$ выражено в радианах. Это следует из выражения

$$\delta \dot{R}_{\Delta\phi}^j = \partial \dot{R}_{\Delta\phi}^j(t_{k+1}) - \delta \dot{R}_{\Delta\phi}^j(t_k) = \Delta_{\Delta\phi} \cdot \cos(\alpha + \gamma_{k+1}) - \Delta_{\Delta\phi} \cos(\alpha + \gamma_k),$$

при условии достижения максимума ошибки: $\sin(\alpha + \gamma_k) + \frac{\Delta\gamma(\phi)}{2} = 1$.

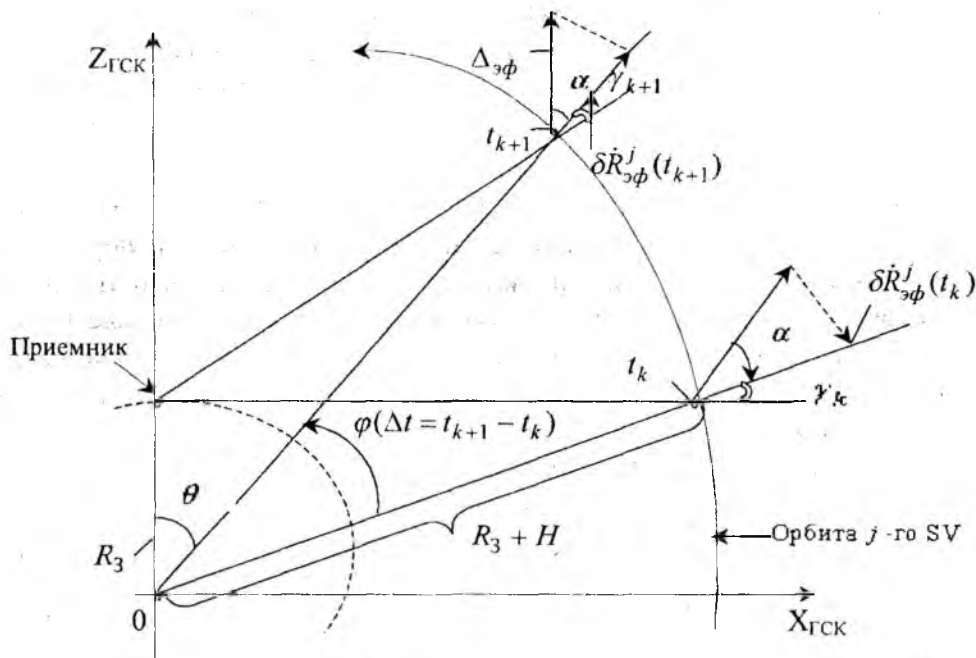


Рис. 4

Из двух треугольников на рисунке с использованием решений треугольников получим

$$\operatorname{tg} \gamma_k = \frac{R_3 \cdot \sin(\theta + \phi)}{(R_3 + H) - R_3 \cdot \cos(\theta + \phi)},$$

$$\operatorname{tg} \gamma_{k+1} = \frac{R_3 \cdot \sin(\theta)}{(R_3 + H) - R_3 \cdot \cos \theta},$$

откуда после взятия разности $\operatorname{tg} \gamma_{k+1} - \operatorname{tg} \gamma_k \approx \Delta\gamma(\phi)$ и нескольких преобразований имеем

$$\Delta\phi(\gamma) \approx \frac{\cos \theta}{\left(1 + \frac{H}{R_3}\right) - \cos \theta} \cdot \phi \approx \frac{\cos \theta}{4 - \cos \theta} \cdot \phi(\Delta t) \approx \frac{1}{3} \phi(\Delta t),$$

где ϕ – в радианах ($\phi = 1,5 \cdot 10^{-4} (\Delta t = 1 \text{ c}) - 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ рад} (\Delta t = 100 \text{ c})$),

тогда $\Delta\gamma_{\max}^{(\text{рад})} = 5 \cdot 10^{-5} (\Delta t = 1 \text{ c}) - 5 \cdot 10^{-3} (\Delta t = 100 \text{ c})$ и

$\Delta \dot{R}_{\Delta\phi_{\max}}^j \approx 0,5 \text{ мм} \cdot (\Delta t = 1 \text{ c}) - 50 \text{ мм} (\Delta t = 100 \text{ c})$ при $\Delta_{\Delta\phi} = 10 \text{ м}$.

Аналогичные выводы можно сделать относительно составляющей из-за погрешностей координат приемника в момент t_k (при $|\delta \bar{X}(t_k)| \approx 10 \text{ м}$).

Таким образом, при обработке наблюдений фазы автономного приемника допустимый интервал не должен превышать 30 – 40 с с точки зрения вклада рассмотренных составляющих погрешностей.

Если речь идет о базовой станции, то с учетом ее точной координатной привязки погрешность $\delta \dot{R}'_{\delta x} < 1 \text{ мм}$ при $\Delta t \leq 100 \text{ с}$. Если применить дифференциальный метод и обрабатывать дифференциальную разность фаз, то даже на удалении роверного приемника от базовой станции до 1000 км погрешность эфемерид уменьшается в 20 – 30 раз, а погрешность определения координат ровера по кодовым наблюдениям может быть доведена до уровня 1 – 3 м, т. е. допустимый интервал разности фаз может быть увеличен до 100 – 300 с.

Теперь необходимо рассмотреть и оценить остальные медленно меняющиеся составляющие погрешностей разностей фазовых наблюдений – ухода часов спутников, ионосферной и тропосферной.

Что касается изменения уходов (медленных флуктуаций) $\Delta \Delta^{j,GPS}(t_{k+1}, t_k)$ часов спутников, то при обработке автономных наблюдений, как показывают экспериментальные исследования, допустимый интервал приращений фазы не должен превышать $\Delta t = 10 - 15 \text{ с}$. При реализации дифференциального режима измерений (при этом фазовые измерения базовой станции должны быть очищены от скачков) рассматриваемая составляющая погрешностей наблюдений практически полностью компенсируется и допустимая длительность Δt будет зависеть от других факторов.

Для тропосферных и ионосферных составляющих необходимо провести отдельное исследование, особенно это требует тропосферная составляющая.

Предварительный анализ фазовых разностей ($L_1 - L_2$), изменение которых во времени пропорционально ($k = (\gamma^2 - 1)$, $\gamma = \frac{77}{60} \approx 1,28$) изменению ионосферной задержки на частоте L_1 , показал, что максимальные значения приращений ионосферной задержки на малых углах места 5 – 10 угл. град. составляют 0,1 – 0,2 см/с, а в некоторых случаях (при $\beta \approx 5^\circ - 7^\circ$) достигают значений 0,4 см/с. Это дает основание говорить, что при использовании и обработке автономных (одна станция/приемник) приращений наблюдений фазы (одной частоты) и при компенсации ионосферной составляющей с помощью модели (например, модели Клобушара) допустимый интервал Δt формирования и обработки приращений фазы L_1 не должен превышать $\Delta t_{k+1} \leq 10 - 15 \text{ с}$. Применение дифференциального режима наблюдений (вместе с модельной компенсацией) позволит заметно увеличить эффективность парирования ионосферной составляющей. Но из-за изменчивой и неоднородной природы ионосферы нужно признать, что при дифференциальном методе базовые линии не должны превышать 100 – 300 км.

При наличии двухчастотных наблюдений L_1 и L_2 можно организовать полную компенсацию ионосферной составляющей путем

- а) формирования разностей ($L_1 - L_2$);
- б) получения гладкой равнодискретной функции приращений функции ($L_1 - L_2$) в условиях наличия фазовых скачков L_1 и L_2 по известной и отработанной методике устранения динамики;
- в) расчета (оценки) приращений ионосферной составляющей погрешности на требуемых интервалах Δt .

Такой двухчастотный подход может позволить практически полностью компенсировать ионосферную составляющую приращений фазовых наблюдений.

Что касается тропосферной составляющей, то очевидно, в приращения фазы обязательно нужно вводить модельные поправки (приращения поправок). Это позволит уменьшить тропосферную составляющую не менее, чем на порядок.

Приращение тропосферной погрешности, при условии, что «роверный» приемник или неподвижен или движется с относительно невысокой скоростью $v \leq 60-100$ км/ч, можно выразить простой приближенной формулой

$$\delta\Delta\dot{R}'_{\text{тр}} \approx 0,1 \cdot \frac{\partial T^j(\beta)}{\partial \beta} \cdot \Delta\beta,$$

где $T^j(\beta)$ – тропосферная составляющая задержки сигнала; β – угол места j -го спутника относительно приемника; $\Delta\beta$ – изменение β за интервал Δt взятия приращений.

Величина $\Delta\beta$ для «ровера» не превышает $0,012$ угл. град./с. Производная $\frac{\partial T(\beta)}{\partial \beta}$ для $\beta = 5^\circ$ не превышает величины 5 м/угл. град. Тогда максимальная величина тропосферной погрешности приращения фаз за $\Delta t = 1$ с составит $5-6$ мм (при использовании модельной компенсации). Для углов $\beta \approx 10-15^\circ$ $\delta\Delta\dot{R}'_{\text{тр}} \approx 2-3$ мм (за секундный интервал). Эффективное уменьшение тропосферной погрешности с использованием дифференциального режима также ограничено базовыми расстояниями от 50 до 100 км в зависимости от различия условий измерений для «ровера» и базовой станции.

Таким образом, допустимый интервал Δt взятия приращений фаз в оговоренных условиях не должен превышать $5-10$ с для автономных наблюдений и $15-30$ с для дифференциальных. Для кинематических наблюдений характерен темп данных 1 Гц и выше. Поэтому рекомендуемый интервал приращений составляет $1-5$ с, а при обработке наблюдений перманентных IGS-станций рекомендуется обрабатывать наблюдения приращений на интервале $10-30$ с с реализацией дифференциального режима (сеть станций) с увеличением минимального угла места $\beta_{\text{min}} \geq 10^\circ$ для уменьшения влияния атмосферных (тропосферных и ионосферных) погрешностей.

Теперь рассмотрим алгоритмы обработки одночастотных (L_1) фазовых наблюдений с целью оценить и устранить фазовые скачки в кинематическом режиме измерений. Обнаружение, оценка и исключение фазовых скачков фазовых наблюдений диапазона L_2 выполняются на основе обработки «безгеометрических» разностей ($L_1 - L_2$) с использованием алгоритмов, описанных выше для обработки статических наблюдений.

Система уравнений, связывающая приращения фазовых и кодовых наблюдений и искомым приращением координат фазового центра приемной антенны роверного приемника $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ (в Гринвичской геоцентрической системе координат) и приращений Δ^{GPS} расхождения шкалы времени «ровера» относительно шкалы ГНСС (на примере GPS) (см. уравнения (1), (2)) на момент Δt_{k+1} относительно момента t_k может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \Delta\hat{L}^j = \frac{\Delta\dot{R}^j + \Delta\Delta^{GPS}}{F^j(\Delta t_k)} + \Delta N^j \cdot \lambda^* + \sqrt{[-\Delta\Delta^{j,GPS} + \Delta T^j - \Delta\dot{I}^j] + \delta\Delta L_{mf}^j}; \\ \Delta\hat{S}^j = F^j(t_{k+1}) + [-\Delta\Delta^{j,GPS} + \Delta T^j - \Delta\dot{I}^j] + \delta\Delta S_{mf}^j, \end{cases} \quad (3)$$

где обозначения соответствуют выражениям (1) и (2), при этом индексы смежных моментов времени опущены;

$$\Delta\dot{R}^j = \sqrt{\left[(\Delta x + (\hat{x}_k - \Delta\hat{X}_{k+1}^j))^2 + (\Delta y + (\hat{y}_k - \hat{Y}_{k+1}^j))^2 + (\Delta z + (\hat{z}_k - \hat{Z}_{k+1}^j))^2 \right]} - \sqrt{(\hat{x}_k - \Delta\hat{X}_k^j)^2 + (\hat{y}_k - \hat{Y}_k^j)^2 + (\hat{z}_k - \hat{Z}_k^j)^2}.$$

Полагаем, что известны на все моменты времени обрабатываемого сеанса наблюдений:

- приближенные координаты x_k, y_k, z_k ровера и соответствующие оценки эфемерид всех спутников на моменты излучения (с учетом релятивистских коррекций и коррекций на вращение Земли); если пункт статический или это базовая станция, то \bar{x}_k – известные постоянные значения;

- модели тропосферной и ионосферной коррекции, а также бортовые гладкие коррекции часов спутников;

- априорные средние значения среднеквадратической погрешности (СКП) шумовой и многолучевой составляющей погрешностей приращений наблюдений: $\sigma_{\Delta L} = 1,0 \text{ см}$, $\sigma_{\Delta S} = 100 \text{ см}$.

После расчета и ввода коррекций в наблюдения (3):

$$\begin{cases} \Delta\hat{L}^j = \frac{\Delta\hat{L}^j + \Delta\hat{\Delta}^{j,GPS}}{F^j(\Delta t_k)} - \Delta\hat{T}^j + \Delta\hat{I}^j \\ \Delta\hat{S}^j = \Delta S^j + \Delta\hat{\Delta}^{j,GPS} - \Delta\hat{T}^j - \Delta\hat{I}^j, \end{cases}$$

систему уравнений можно переписать как

$$\begin{cases} \Delta\hat{L}^j = F^j(t_{k+1}) + \Delta N^j \cdot \lambda^* + \delta\Delta\hat{L}_{\Sigma}^j; \\ \Delta\hat{S}^j = F^j(t_{k+1}) + \delta\Delta\hat{S}_{\Sigma}^j, \end{cases}$$

где $\delta\Delta\hat{L}_{\Sigma}^j$, $\delta\Delta\hat{S}_{\Sigma}^j$ – суммарные остаточные после ввода коррекций погрешности и погрешности из-за многолучевости и шумов.

Или более детально, уравнения и их вес:

$$\begin{pmatrix} P_{\Delta L} \\ P_{\Delta L} \\ \dots \\ P_{\Delta L} \\ P_{\Delta S} \\ P_{\Delta S} \\ \dots \\ P_{\Delta S} \end{pmatrix} \begin{cases} \Delta\hat{L}^{(1)} = \Delta\dot{R}^{(1)}(\Delta\bar{x}) + \Delta_{\Delta} + \Delta N^{(1)} \cdot \lambda^* + \delta\Delta\hat{L}_{\Sigma}^{(1)}; \\ \Delta\hat{L}^{(2)} = \Delta\dot{R}^{(2)}(\Delta\bar{x}) + \Delta_{\Delta} + \Delta N^{(2)} \cdot \lambda^* + \delta\Delta\hat{L}_{\Sigma}^{(2)}; \\ \dots \\ \Delta\hat{L}^{(m_l)} = \Delta\dot{R}^{(m_l)}(\Delta\bar{x}) + \Delta_{\Delta} + \Delta N^{(m_l)} \cdot \lambda^* + \delta\Delta\hat{L}_{\Sigma}^{(m_l)}; \\ \Delta\hat{S}^{(1)} = \Delta\dot{R}^{(1)}(\Delta\bar{x}) + \Delta_{\Delta} + \delta\Delta\hat{S}^{(1)}; \\ \Delta\hat{S}^{(2)} = \Delta\dot{R}^{(2)}(\Delta\bar{x}) + \Delta_{\Delta} + \delta\Delta\hat{S}^{(2)}; \\ \dots \\ \Delta\hat{S}^{(m_s)} = \Delta\dot{R}^{(m_s)}(\Delta\bar{x}) + \Delta_{\Delta} + \delta\Delta\hat{S}^{(m_s)}, \end{cases} \quad (4)$$

где m – число спутников, для которых имеются приращения наблюдений на текущем интервале Δt ; $m \geq 4$; m_l – число приращений фазы; m_s – число приращений кодовых псевдодальностей; $\Delta\bar{x} = \|\Delta x, \Delta y, \Delta z\|^T$ – искомые приращения координат; $\Delta_{\Delta} = \Delta\Delta^{GPS}$ – искомое приращение расхождения часов приемника относительно шкалы GPS.

Вектор искомых параметров

$$\bar{\theta} = \|\Delta\bar{x}^T, \Delta_\Delta\|^T = \|\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta_\Delta\|^T. \quad (5)$$

Вектор приращений наблюдений

$$\hat{\theta} = \|\Delta\hat{L}^{(1)}, \Delta\hat{L}^{(2)}, \dots, \Delta\hat{L}^{(m_L)}; \Delta\hat{S}^{(1)}, \Delta\hat{S}^{(2)}, \dots, \Delta\hat{S}^{(m_S)}\|^T = \|\hat{\theta}_L^T; \hat{\theta}_S^T\|^T. \quad (6)$$

Задача заключается в одновременной оценке вектора $\bar{\theta}$ и в обнаружении одновременно одного или нескольких циклических (или полуматричных скачков) ($\Delta N^j = 0$ или $\Delta N^j \neq 0$) в приращениях фазы.

Задача считается решенной с приемлемым качеством, если удается:

- определить элементы вектора $\bar{\theta}$ с точностью не хуже 10 см ($\Gamma\Phi \leq 2-4$), невязки между измеренными и вычисляемыми приращениями фазы с точностью не хуже 2,5 – 4 см,
- обнаружить, оценить и устранить скачки приращений фазы в наблюдениях одного или нескольких спутников или просто отбраковать решение со скачками, если фазовых наблюдений недостаточно для этого.

В любом случае, должно быть получено решение $\hat{\theta}$, даже по приращениям кодовых псевдодальностей, причем во всех случаях должна быть оценена корреляционная матрица погрешностей решения и корреляционная матрица приращений фазовых и кодовых псевдодальностей по корреляционной матрице погрешностей оценок элементов вектора $\hat{\theta}$.

Алгоритм оценки $\hat{\theta}$ реализуется по следующей стандартной итерационной процедуре метода наименьших квадратов (МНК) для нелинейных систем по схеме линеаризации Ньютона – Гаусса:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{(i+1)} = \hat{\theta}_{(i)} + \Delta\hat{\theta}_{(i+1)}; i = 0, 1, 2, \dots \text{- номер шага итерационного процесса;} \\ \hat{\theta}_{(i+1)} = [A_{(i)}^T \cdot W \cdot A_{(i)}]^{-1} \cdot A_{(i)}^T \cdot W \cdot [\bar{Q} - F(\hat{\theta}_{(i)})]. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь

$$\underbrace{A_{(i)}}_{(m_L+m_S) \times 4} = \left\| \frac{\partial \bar{Q}(\bar{\theta})}{\partial \bar{\theta}} \right\| = \left\| \begin{array}{c} B_L(i) \\ B_S(i) \end{array} \right\|;$$

$$\underbrace{W}_{[m_L+m_S] \times [m_L+m_S]} = \left\| \begin{array}{ccc|ccc} p_{\Delta L}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & . & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{\Delta L}^2 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & p_{\Delta S}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{\Delta S}^2 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c|c} W_L & 0 \\ \hline 0 & W_S \end{array} \right\|;$$

$$B_{L,S}(i) = \begin{pmatrix} \frac{\Delta \hat{x}_{(i)} + (\hat{x}_k - \hat{X}_{k+1}^{(1)})}{\hat{R}_{k+1}^{(1)}(i)} & \frac{\Delta \hat{y}_{(i)} + (\hat{y}_k - \hat{Y}_{k+1}^{(1)})}{\hat{R}_{k+1}^{(1)}(i)} & \frac{\Delta \hat{z}_{(i)} + (\hat{z}_k - \hat{Z}_{k+1}^{(1)})}{\hat{R}_{k+1}^{(1)}(i)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\Delta \hat{x}_{(i)} + (\hat{x}_k - \hat{X}_{k+1}^{(m)})}{\hat{R}_{k+1}^{(m)}(i)} & \frac{\Delta \hat{y}_{(i)} + (\hat{y}_k - \hat{Y}_{k+1}^{(m)})}{\hat{R}_{k+1}^{(m)}(i)} & \frac{\Delta \hat{z}_{(i)} + (\hat{z}_k - \hat{Z}_{k+1}^{(m)})}{\hat{R}_{k+1}^{(m)}(i)} \end{pmatrix};$$

для $m \geq 4$;

или $\begin{cases} m = m_L, m_S \geq m_L; \\ m = m_S, m_S \geq m_L; \end{cases}$

$$\underbrace{W_L}_{[m \cdot L]} = \text{diag} \{ p_{\Delta L}^2, \dots, p_{\Delta L}^2 \};$$

$$\underbrace{W_S}_{[m \cdot S]} = \text{diag} \{ p_{\Delta S}^2, \dots, p_{\Delta S}^2 \};$$

$$\hat{R}_{k+1}^{(j)}(i) = \sqrt{[\Delta \hat{x}_{(i)} + (\hat{x}_k - \hat{X}_{k+1}^{(j)})]^2 + [\Delta \hat{y}_{(i)} + (\hat{y}_k - \hat{Y}_{k+1}^{(j)})]^2 + [\Delta \hat{z}_{(i)} + (\hat{z}_k - \hat{Z}_{k+1}^{(j)})]^2};$$

$$\underbrace{\bar{F}(\hat{\theta}_{(i)})}_{[m_L + m_S]} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta \hat{R}^{(1)}(\Delta \hat{x}_{(i)}) + \hat{\Delta}_{\Delta}(i)}{\hat{R}_L} \\ \dots \\ \frac{\Delta \hat{R}^{(m_L)}(\Delta \hat{x}_{(i)}) + \hat{\Delta}_{\Delta}(i)}{\hat{R}_L} \\ \dots \\ \frac{\Delta \hat{R}^{(1)}(\Delta \hat{x}_{(i)}) + \hat{\Delta}_{\Delta}(i)}{\hat{R}_S} \\ \dots \\ \frac{\Delta \hat{R}^{(m_S)}(\Delta \hat{x}_{(i)}) + \hat{\Delta}_{\Delta}(i)}{\hat{R}_S} \end{pmatrix};$$

$$\Delta \hat{R}^{(j)}(\Delta \hat{x}_{(i)}) = \sqrt{[\Delta \hat{x}_{(i)} + (\hat{x}_k - \hat{X}_{k+1}^{(j)})]^2 + [\Delta \hat{y}_{(i)} + (\hat{y}_k - \hat{Y}_{k+1}^{(j)})]^2 + [\Delta \hat{z}_{(i)} + (\hat{z}_k - \hat{Z}_{k+1}^{(j)})]^2} - \sqrt{(\hat{x}_k - \hat{X}_k^{(j)})^2 + (\hat{y}_k - \hat{Y}_k^{(j)})^2 + (\hat{z}_k - \hat{Z}_k^{(j)})^2};$$

$$Q(\bar{\theta}) = \| Q_L^T | Q_S^T \|^T.$$

Итерационный процесс будем считать успешно завершённым, если

$$\frac{1}{\sqrt{4}} \left[\Delta \hat{\theta}_{(i+1)}^T \cdot \Delta \hat{\theta}_{(i+1)} \right]^{1/2} \leq \varepsilon, \text{ где } \varepsilon - \text{заранее заданная остаточная погрешность.}$$

Несколько упростим выражение (7) для оценки поправки $\Delta \hat{\theta}_{(i+1)}$:

$$\Delta \hat{\theta}_{(i+1)} = [B_L^T W_L B_L + B_S^T W_S B_S]_{(i+1)}^{-1} \cdot [B_L^T W_L \Delta \hat{Q}_L + B_S^T W_S \Delta \hat{Q}_S], \quad (8)$$

где $\Delta \hat{Q}_L = \|\Delta Q_L - \bar{F}_L\|_{(t+1)}$; $\Delta \hat{Q}_S = \|\Delta Q_S - \bar{F}_S\|_{(t+1)}$.

Корреляционная матрица $K_{\hat{\theta}}$ погрешностей оценки вектора $\hat{\theta}$ вычисляется на последнем шаге итераций:

$$K_{\hat{\theta}} = [B_L^T W_L B_L + B_S^T W_S B_S]^{-1} \quad (9)$$

[44]

Также на последнем шаге вычисляются векторы невязок ΔQ_L и ΔQ_S , элементы которых (для каждого спутника отдельно) могут сравниваться с заранее определенными порогами для получения вывода о наличии или отсутствии скачков в приращениях фазы. Порог для невязок фазы может быть выбран на уровне $\Pi_{\Delta} = \lambda_1/5$.

Корреляционная матрица оценок приращений фазы \hat{F}_L , т.е. оценка погрешностей ΔQ_L :

$$K_{\Delta L} = \left\| \frac{\partial \bar{Q}_L(\bar{\theta})}{\partial \bar{\theta}} \right\| \cdot K_{\hat{\theta}} \cdot \left\| \frac{\partial \bar{Q}_L(\bar{\theta})}{\partial \bar{\theta}} \right\|^T = \underbrace{D \cdot K_{\hat{\theta}} \cdot D^T}_{[m_L \cdot 4]} \quad (10)$$

По диагональным элементам матрицы $K_{\Delta L}$ ($\sigma_{\Delta L} = \sqrt{K_{\Delta L}(j, j)}$) можно судить о точности оценки приращений фазы для всех m спутников, даже если часть из них была исключена из обработки в ее процессе. При этом можно рассчитать все приращения фазы и сравнить их с реальными приращениями наблюдений.

Вначале полагаем, что справедлива гипотеза об отсутствии скачков приращений фазы. В этом случае $m_L = m_S$ можно ожидать сходимости итерационного процесса за 1 – 3 итерации. Для минимизации количества итераций целесообразно как можно точнее определить вектор $\hat{\theta}_{(0)} = \|\Delta \hat{x}_{(0)}, \Delta \hat{y}_{(0)}, \Delta \hat{z}_{(0)}, \Delta \hat{t}_{(0)}\|^T$. Для этого необходимо кодовое решение относительно параметров $\Delta \hat{x}(t), \Delta \hat{y}(t), \Delta \hat{z}(t), \Delta \hat{t}(t)$ сгладить и затем получить оценки приращений координат и уходов шкалы времени. В этом случае возможно получить решение за одну итерацию.

Если число итераций превышает 5 и процесс не сходится, то можно полагать, что в каком-либо из приращений фазы (или одновременно в нескольких приращениях) присутствуют скачки фазы $\Delta N^{(j)} \neq 0$. Тогда необходимо последовательно проверить гипотезы:

- скачок в одном приращении;
- скачки в более, чем одном приращении.

А) В общем случае должно выполняться условие $m \geq 4$. В этом случае возможно «почувствовать» наличие скачков в фазе несущей. В случае $m = 4$, если даже итерационный процесс сошелся, а анализ невязок (их сравнение с порогом) показал превышение хотя бы в одном наблюдении, необходимо получить решение только по кодовым наблюдениям, вычислить его корреляционную матрицу и пометить решение как грубое.

В) Если $m_L = 5$, и невязки (хотя бы одна) показывают превышение порога, то необходимо перебрать (m_L) вариантов решения с отбрасыванием из вектора наблюдений последовательно одного из m_L значений $\Delta \hat{L}^{(i)}$.

В1) Если с исключением одного из наблюдений $\hat{\Delta L}$ точное решение задачи достигается (если фазовые невязки не превышают допустимый порог), то кроме матрицы $K_{\hat{\theta}}$ рассчитываются значения элементов вектора \vec{F}_L (расчетные значения приращений ΔL из вектора $\Delta \vec{\theta}_L$ и их корреляционная матрица $K_{\Delta L}$. Расчет выполняется и для «выпавшего» значения $\hat{\Delta L}^{(i)}$. Разность $\hat{\Delta L}^{(i)} - \hat{\Delta L}_{\text{расч}}^{(i)}$ проверяется на соответствие циклическому или полуциклическому скачку фазы i -го спутника.

Если эта гипотеза подтверждается:

$$\left[\hat{\Delta L}^{(i)} - \hat{\Delta L}_{\text{расч}}^{(i)} \right] = \Delta N^{(i)} \cdot \lambda^* + \delta_i,$$

где $|\delta_i| \leq 1/5$; $\Delta N^{(i)}$ – целое, то осуществляется коррекция приращения $\hat{\Delta L}^{(i)}$ на величину $\Delta N^{(i)} \cdot \lambda^*$, задача решается вновь для полной выборки m_L , фиксируется значение скачка фазы для данного момента времени t_{k+1} .

В2) Если с последовательным исключением наблюдений из выборки $\hat{\Delta \theta}$ для оставшихся «четверок» не найдено точного решения, то принимается решение о наличии двух и более скачков и недостаточности информации для получения точного решения. Оценка приращений координат осуществляется по кодовым наблюдениям.

С) Если $m_L \geq 6$ и решение показывает наличие скачков, то стратегия обработки сводится к следующим действиям:

- поочередно отбрасывается по одному наблюдению, каждый раз анализируются невязки и вычисляется средняя невязка; если в каком-либо варианте отбрасывания наблюдений с оставшимися достигается общее решение (все невязки меньше порога), то отброшенное наблюдение идентифицируется с наличием скачка и оно обрабатывается по приведенной выше схеме с возможностью коррекции и повторного использования;

- если все отбрасывания по одному наблюдению не дают эффекта, то отбрасывается то наблюдение, без которого средняя невязка $\sqrt{\delta_{(i)}^2} = \left[\frac{1}{m_L} \cdot \Delta \hat{\theta}_L^T \cdot \Delta \hat{\theta}_L \right]^{1/2}$ – наименьшая; далее действия повторяются с укороченной выборкой на одно наблюдение;

- если отбрасывание и второго наблюдения не дало эффекта, то по критерию влияния отброшенного наблюдения на среднее значение невязки бракуется теперь и второе наблюдение;

- процесс повторяется циклически с еще раз укороченной выборкой;

- если не найдено приемлемого решения и далее по фазе, то окончательно формируется кодовое решение.

В принципе, можно остановиться (для ускорения и упрощения решения) на усеченном варианте стратегии (с проверкой за один подход):

$$\begin{cases} \text{HipA: в наблюдениях 1 скачок} \rightarrow \text{фазовое решение;} \\ \text{HipB: в наблюдениях более 1 скачка} \rightarrow \text{кодовое решение.} \end{cases}$$

В случае выполнения обработки наблюдений фазы L_1 базовых станций (приемников) в статическом режиме априори известно, что изменение координат:

Рассмотрим также случай обработки наблюдений фазы L_1 «роверного» приемника в кинематическом режиме съемки с использованием предварительно обработанных наблюдений базовой станции.

В данном случае полагаем, что при обработке наблюдений «роверного» приемника формируются одинарные разности фазовых (и кодовых) наблюдений между «роверным» приемником и базовой станцией. Преимущества дифференциального режима в этом случае очевидны (см. выше) – исключаются погрешности часов спутника, уменьшаются эфемеридные и атмосферные погрешности.

Тогда приращения по времени (3) могут быть записаны в виде

$$\begin{cases} \Delta \hat{L}^j = \left[\Delta \dot{R}_{\Pi}^j - \Delta \dot{R}_{\text{реф}}^j \right] + \left[\Delta \Delta_{\Pi}^{\text{GPS}} - \Delta \Delta_{\text{реф}}^{\text{GPS}} \right] + \Delta N_{\Pi}^j \cdot \lambda^* + \delta \Delta_{\text{эф}}^j + \delta \Delta T^j + \\ \quad + \delta \Delta I^j + \left[\delta \Delta L_{\Pi}^j - \delta \Delta L_{\text{реф}}^j \right]; \\ \Delta \hat{S}^j = \left[\Delta \dot{R}_{\Pi}^j - \Delta \dot{R}_{\text{реф}}^j \right] + \left[\Delta \Delta_{\Pi}^{\text{GPS}} - \Delta \Delta_{\text{реф}}^{\text{GPS}} \right] + \delta \Delta_{\text{эф}}^j + \delta \Delta T^j + \\ \quad + \delta \Delta I^j + \left[\delta \Delta S_{\Pi}^j - \delta \Delta S_{\text{реф}}^j \right], \end{cases} \quad (13)$$

где при сохранении общих обозначений индексы « Π » и «реф» означают – «потребитель» (ровер) и референсная (базовая) станция соответственно; $\delta \Delta_{\text{эф}}, \delta \Delta T, \delta \Delta I$ – разностные (для текущей базы между «ровером» и базовой станцией) значения эфемеридных, тропосферных и ионосферных погрешностей соответственно;

$$\begin{aligned} \Delta \Delta_{\Pi}^{\text{GPS}} - \Delta \Delta_{\text{реф}}^{\text{GPS}} &= \Delta \Delta_{\Pi\text{-реф}}; \\ \Delta \dot{R}_{\text{реф}}^j &= \sqrt{\left(\hat{x}^{\text{реф}} - \hat{X}_{k+1}^j \right)^2 + \left(\hat{y}^{\text{реф}} - \hat{Y}_{k+1}^j \right)^2 + \left(\hat{z}^{\text{реф}} - \hat{Z}_{k+1}^j \right)^2} - \\ &\quad - \sqrt{\left(\hat{x}^{\text{реф}} - \hat{X}_k^j \right)^2 + \left(\hat{y}^{\text{реф}} - \hat{Y}_k^j \right)^2 + \left(\hat{z}^{\text{реф}} - \hat{Z}_k^j \right)^2}. \end{aligned}$$

После ввода коррекций и учета $\Delta \dot{R}_{\text{реф}}^j$ получим систему уравнений – аналог системы (4) с той разницей, что вместо параметра Δ_{Δ} оценивается параметр $\Delta \Delta_{\Pi\text{-реф}}$ (в дифференциальных наблюдениях увеличиваются шумовые и многолучевые составляющие погрешностей, но значительно уменьшаются медленно меняющиеся погрешности).

Далее решение системы уравнений выполняется по алгоритму, описанному ранее.

Целесообразно также рассмотреть возможность использования двухчастотных фазовых наблюдений для коррекции ионосферной составляющей погрешностей приращения фазы наблюдений диапазона L_1 . Поскольку при обработке приращений фазы L_1 желательно как можно точнее учесть ионосферную составляющую для больших интервалов обработки разности фаз по времени, то при наличии двухчастотных наблюдений «роверного» приемника или станции (как в абсолютном, так и в дифференциальном режимах) можно практически полностью исключить ионосферную составляющую приращений фазы следующим образом:

- формируется для заданного участка наблюдений j -го спутника разность

$$(L_1 - L_2) = (\gamma^2 - 1) \cdot \dot{I} + \underbrace{(\Delta N \cdot \lambda_1 - \Delta N \cdot \lambda_2)}_{const} + c + (\delta L_1 - \delta L_2);$$

эта разность может содержать не только неизвестные константы, но и «слипы» в наблюдениях фазы обеих частот;

- линейная комбинация (L_1-L_2) (в ней исключена геометрия, эфемериды, часы и тропосфера) подвергается (с использованием процедуры оценки «слипов») обработке, в ходе которой можно получить сглаженное значение «безгеометрической» функции (L_1-L_2) с точностью до неизвестной константы, причем с интерполяцией и экстраполяцией на моменты пропущенных наблюдений. Эта кривая является гладкой и не содержит выбросов из-за «слипов», поэтому оценки ее изменения (приращения) с высокой точностью соответствуют изменениям ионосферной погрешности;

- простое масштабирование дает возможность сформировать и исключить ионосферные коррекции в приращении фазы L_1 .

Такой подход дает возможность увеличить интервал формирования и обработки приращений фазы L_1 .

Рассмотрим теперь использование оценок приращений фазы L_1 на смежных интервалах для коррекции (компенсации) динамики «роверного» приемника и сформулируем рекомендации по использованию полученных оценок.

1) В результате обработки по смежным моментам времени t_{k+1} и t_k имеем оценки приращений: $\Delta\hat{x}_{k+1}, \Delta\hat{y}_{k+1}, \Delta\hat{z}_{k+1}, \hat{\Delta}_{\Delta_{k+1}}$. Кроме того, для этих оценок имеем оценки корреляционных матриц. Если в каких-либо точках отсутствуют точные оценки (по фазовым наблюдениям), либо были получены грубые оценки (по кодовым наблюдениям), то целесообразно прогладить оценки $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta_{\Delta_{k+1}}$, чтобы интерполировать оценки на отсутствующие точки, либо на точки (моменты), где были получены грубые оценки. В итоге имеем точные значения приращений.

2) Теперь можно получить текущее изменение координат «ровера» относительно начальной точки всего сеанса измерений, т. е. координаты и время приемника, с точностью до начальной константы:

$$\Delta\hat{x}(t_k) = \sum_{L=0}^{k-1} \Delta\hat{x}_{L+1}; \quad \Delta\hat{y}(t_k) = \sum_{L=0}^{k-1} \Delta\hat{y}_{L+1}; \quad \Delta\hat{z}(t_{k+1}) = \sum_{L=0}^{k-1} \Delta\hat{z}_{L+1};$$

$k = 1, K$; (K – число эпох сеанса);

$$\hat{\Delta}(t_k) = \sum_{L=0}^{k-1} \hat{\Delta}_{\Delta} \hat{R}_{L+1}; \quad \Delta\hat{x}_1 = \Delta\hat{y}_1 = \Delta\hat{z}_1 \equiv 0.$$

3) Чтобы получить абсолютные значения текущих координат и уходов шкалы времени «роверного» приемника, необходимо по известной методике:

- определить разность кодовых оценок $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\Delta}$ и фазовых оценок $\hat{x}(t_k), \hat{y}(t_k), \hat{z}(t_k), \hat{\Delta}(t_k)$, полученных ранее;

- сгладить полученные разности, используя, например, процедуры сплайн-аппроксимации;

- сложить медленно меняющуюся сглаживающую функцию и фазовые оценки координат и времени.

4) Теперь полученные «бесшумовые» значения координат и времени можно использовать для расчета фазы псевдодальностей и устранения динамики в наблюдениях по приведенным выше соотношениям.

5) Целесообразно также рассмотреть задачу контроля качества починки фазовых скачков с использованием измененного метода обработки приращений. При изложенной обработке приращений (главным образом для темпа наблюдений от 1 до $1/5 \Gamma_{lf}$) осуществляется обнаружение (и, по возможности, устранение) скачков на смежных интервалах ($1 - 5$ с).

Здесь возникает задача контроля скачков на больших допустимых интервалах (1 – 15 с для автономного режима и до 30 с для дифференциального) тех или иных спутников. Для реализации контроля необходимо:

- определить приращения координат и времени на участках пропусков наблюдений по описанной выше схеме;
- рассчитать с учетом всех поправок приращения фазы для анализируемых участков;
- сравнить измеренные и расчетные приращения фаз, проанализировать невязки, сравнив с порогом.

Таким образом, в данном подразделе детально изложены предложенные алгоритмы обнаружения и оценки фазовых скачков в кинематических ГНСС наблюдениях и приведены практические рекомендации по их применению и ограничения.

Выполненные многочисленные экспериментальные исследования с использованием реальных наблюдений двухчастотных ГНСС приемников, выполненных в районах Житомира, Винницы и Одессы в процессе аэрофотосъемок на борту самолета и вертолета и на базовых станциях (данные представлены коммерческим предприятием «Магеллан», Киев), показали, что расчетные оценки допустимых интервалов взятия приращений соответствуют реальным значениям. Реализация и тестирование предложенных алгоритмов обработки наблюдений с высокой динамикой в программном комплексе «ОСТАВА_PPA» доказали справедливость теоретических исследований и возможность выполнения надежной предварительной обработки фазовых наблюдений, полученных в кинематическом режиме съемки.

Обработка кинематических фазовых наблюдений. Альтернативный метод

Как упоминалось выше, расширить возможности и повысить надежность устранения фазовых скачков одночастотных и двухчастотных кинематических наблюдений в сложных условиях позволяет применение другого, альтернативного, более эффективного и надёжного метода восстановления непрерывности фазовых наблюдений для условий полной или частичной кратковременной потери наблюдений [15, 16], который основан на использовании приращений наблюдений по времени и специальной процедуры совместного МНК-оценивания совокупности континуальных (приращений координат и расхождений часов) и дискретных параметров (циклических фазовых скачков). Здесь приводится краткое описание указанного метода решения поставленной задачи и главные результаты его тестирования с использованием реальных ГНСС наблюдений.

В ходе исследований был создан новый эффективный и надёжный метод восстановления непрерывности фазовых двухчастотных и одночастотных наблюдений (обнаружения, оценки и устранения дискретных фазовых скачков) для условий полной или частичной кратковременной потери двухчастотных наблюдений [15, 16]. Исследования проводились для случаев полной потери наблюдений всех спутников текущего созвездия на интервале 5 – 30 с и потери наблюдений части спутников текущего созвездия на заданном интервале. Подход, изложенный в [15], позволяет восстанавливать непрерывность фазовых наблюдений даже при полной потере слежения за спутниками на интервалах до 20 с. При этом, в качестве начальной априорной информации используются исходные кодовые наблюдения без применения специальных процедур их сглаживания. Использование фазовых наблюдений разностной частоты (Wide Lane) в качестве промежуточной шкалы позволяет обеспечить высокую надёжность устранения фазовых циклических скачков на частоте L_1 . Однако, с учетом широкого практического использования одночастотной аппаратуры, актуальным и важным для практики является использование предложенного подхода для решения задачи обнаружения, оценки и устранения циклических фазовых скачков одночастотных кинематических ГНСС-наблюдений.

Для выделения фазовых скачков и уменьшения остаточных погрешностей тропосферных и ионосферных задержек, для обработки используются приращения по времени кодовых и фазовых наблюдений (без потери общности будем здесь рассматривать GPS наблюдения).

Это позволяет устранить инструментальные задержки в передающих трактах спутников и приёмном тракте приёмника, а также случайную начальную фазу опорного генератора на спутниках:

$$\begin{cases} \Delta \hat{S}_{1,2i}^j = \Delta F^j + k_{1,2} \cdot \Delta I^j + \delta \Delta S_{1,2i}^j \\ \Delta \hat{L}_{1,2i}^j = \Delta F^j - k_{1,2} \cdot \Delta I^j - \Delta N_{1,2}^j \cdot \lambda_{1,2} + \Delta \varphi_0 \cdot \lambda_{1,2} + \delta \Delta L_{1,2i}^j \end{cases}, \quad (14)$$

где $\Delta \hat{S}_{1,2i}^j$ – приращение кодовой псевдодальности между соседними временными эпохами (между j -м спутником и i -м приёмником) на 1-й и на 2-й частотах соответственно;

$\Delta \hat{L}_{1,2i}^j$ – приращение фазовой псевдодальности между соседними временными эпохами (между j -м спутником и i -м приёмником) на 1-й и на 2-й частотах соответственно;

$$\Delta F^j = \Delta R_i^j + [\Delta \Delta_i^{GPS} - \Delta \Delta^{j,GPS}] + \Delta T_i^j;$$

ΔR_i^j – приращение геометрического расстояния между i -м приёмником и j -м спутником;

$\Delta \Delta_i^{GPS}$ – приращение отклонений шкалы времени часов приёмника от системного времени;

$\Delta \Delta^{j,GPS}$ – приращение отклонений шкалы времени часов спутника от системного времени;

ΔT_i^j – приращение тропосферной задержки сигнала;

ΔI^j – приращение ионосферной задержки сигнала;

$k_1=1; k_2=\gamma^2$ – ионосферная константа;

$\delta \Delta S_{1,2i}^j, \delta \Delta L_{1,2i}^j$ – шумы и многолучевость кодовых и фазовых наблюдений соответственно;

$\Delta N_{1,2}^j$ – приращения целочисленной фазовой неоднозначности (величина фазового скачка) – $\Delta N_{1,2}^j = 0$, если скачок отсутствует;

$\lambda_{1,2}$ – длина волны на 1-й и на 2-й частотах соответственно.

Полагаем, что на всем интервале наблюдений приёмник не выключался, поэтому $\Delta \varphi_0$ равно нулю (приращение случайной начальной фазы опорного генератора приёмника).

Также полагаем, что в представленные приращения наблюдений введены модельные (или дифференциальные и модельные) коррекции тропосферной и ионосферной составляющих с использованием текущего решения навигационной задачи (НЗ). Эфемеридная составляющая будет пренебрежимо мала, так что на интервале $\Delta t = (t_{k+1} - t_k) = 10 - 15$ с максимальные ($\delta=3\sigma$) медленно меняющиеся погрешности фазы (\hat{L}_1, \hat{L}_2) не превысят 1 – 2 см вместе с суммарными флуктуационными и многолучевыми погрешностями. Составляющей $\Delta \Delta^{j,GPS}$ на рассматриваемом интервале $\Delta t = 10 - 15$ с можно пренебречь. Таким образом, суммарные погрешности приращений фазовых и кодовых наблюдений можно оценить как $\delta_{L1,L2} = 1 - 2$ см, $\delta_{S1,S2} = 1 - 2$ м.

Положим, что имеем кодовое решение НЗ в моменты t_{k+1}, t_k . Используя линейное разложение $\Delta \mathbf{F}^j(t_{k+1}, t_k)$ в ряд Тейлора (линеаризация) и введя в наблюдения тропосферные и ионосферные коррекции, получим

$$\begin{cases} \Delta \hat{\mathbf{S}}'_{1,2} - \Delta \hat{\mathbf{F}}^j = \Delta \hat{\mathbf{S}}'_{1,2} = \|\hat{\mathbf{a}}'_{k+1}\|^j \cdot \Delta \bar{\mathbf{x}} + \Delta_{\Delta} + \delta \Delta \hat{\mathbf{S}}^j_{1,2} \\ \Delta \hat{\mathbf{L}}'_{1,2} - \Delta \hat{\mathbf{F}}^j = \Delta \hat{\mathbf{L}}'_{1,2} = \|\hat{\mathbf{a}}'_{k+1}\|^j \cdot \Delta \bar{\mathbf{x}} + \Delta_{\Delta} - \Delta \mathbf{N}'_{1,2} \cdot \lambda_{1,2} + \delta \Delta \hat{\mathbf{L}}^j_{1,2} \end{cases}, \quad (15)$$

где $\|\hat{\mathbf{a}}'_{k+1}\|$ – вектор направляющих косинусов j -го спутника относительно приёмника; $\Delta \bar{\mathbf{x}}$ – вектор поправок к приращениям координат; Δ_{Δ} – поправка к приращению времени.

В приведенных системах уравнений (14), (15) для фазовых наблюдений опущены составляющие погрешностей, обусловленные влиянием так называемого «wind-up»-эффекта, который является дополнительным фазовым набегом из-за изменения взаимной ориентации (вращения) антенн спутника и приёмника. Фазовыми набегам, которые обусловлены вращением спутников ГНСС вокруг своей оси в процессе ориентирования на Солнце, в приращениях по времени на интервалах в несколько десятков секунд можно пренебречь. Фазовыми же набегам («wind-up»-эффект), обусловленными вращением приемной антенны, пренебрегать нельзя, так как величина этого эффекта на указанных интервалах наблюдений может составлять от долей цикла до нескольких циклов, в зависимости от скорости вращения антенны. Но, поскольку этот эффект является одинаковым для всех спутников текущего созвездия, то его можно объединить и оценивать совместно с уходом шкалы времени приёмника относительно шкалы времен ГНСС. Уравнения (15), в общем случае, также включают неизвестные целочисленные неоднозначности $\Delta \mathbf{N}^j$. Неопределенность выражается в возможности одновременного варьирования величины $\Delta \mathbf{N}^j$ и Δ_{Δ} при сохранении одной и той же величины их разности. Ввиду этого целесообразно трансформировать (15) в эквивалентную систему уравнений, в которой будут явно выражены двойные разности целочисленных переменных $\nabla \Delta \mathbf{N}^j \cdot \lambda$ без явного формирования разностей уравнений. Соответствующие преобразования системы уравнений (15) и построение алгоритма оценки циклических фазовых скачков показаны в работе [15].

Задача сводится к следующим действиям:

- после преобразований (декорреляции и приведения к компактной форме) исходных уравнений согласно [15] и находится МНК-оценка целочисленного вектора неоднозначностей (искомых фазовых скачков) как континуальных переменных (float-оценка);
- полученные оценки неоднозначностей округляются до ближайшего целого и результат округления принимается за начальное приближение искомого вектора неоднозначностей;
- исходя из оценки корреляционной матрицы float-оценки неоднозначностей, определяется диапазон целочисленного перебора элементов вектора неоднозначностей в окрестности float-оценки;
- осуществляется поиск оптимального целочисленного решения путем минимизация целевой функции (суммы квадратов невязок преобразованного вектора наблюдений и подбираемой функции – см. [15]).

Как и в случае обработки двухчастотных фазовых наблюдений и в случае обработки одночастотных наблюдений [16], существуют два возможных варианта разрыва фазовых наблюдений. Во-первых, возможен предельный случай, когда между моментами времени t_{k+1}, t_k имеется разрыв всех наблюдений и существует априорная неопределенность в отношении возможных скачков фазы всего текущего созвездия спутников. Во-вторых, наиболее вероятна ситуация, когда возникают пропуски наблюдений фазы из-за временных потерь слежения (а значит, возможно и возникновение фазовых скачков) для одного или нескольких

спутников, но не всех спутников текущего созвездия. Особенности обработки одночастотных наблюдений заключаются в том, что не существует возможности сформировать промежуточную измерительную шкалу (Wide Lane) для повышения надёжности решения задачи. Поэтому процедура восстановления непрерывности одночастотных наблюдений, с одной стороны, упрощается, а с другой – не имеет возможности использовать высокоточную дополнительную информацию (наблюдения Wide Lane). Очевидно, что следует ожидать снижения надёжности обнаружения и оценки целочисленных скачков L_1 наблюдений по сравнению с двухчастотным случаем.

В случае полного разрыва наблюдений на первом этапе обработки определяются двойные разности фазовых неоднозначностей на первой частоте ($\nabla\Delta\bar{N}_{L1}$). А на втором, после оценки $\nabla\Delta\hat{N}_{L1}$ и введения коррекций в фазовые наблюдения $\Delta\hat{L}$, определяются одинарные разности циклических фазовых скачков $\Delta\bar{N}_{L1}$. В случае частичного разрыва наблюдений, на первом же этапе обработки возможна оценка одинарных разностей циклических фазовых скачков $\Delta\bar{N}_{L1}$. Для повышения надёжности решения применяются дополнительные подходы, которые детально описаны в работах [15, 16].

В ходе статистического моделирования и тестирования предложенного альтернативного метода обнаружения и оценки фазовых циклических скачков с использованием реальных данных были получены следующие выводы и практические рекомендации.

Двухчастотный случай

1) Предложенный метод позволяет получить надежное решение (с вероятностью $p \geq 0,99$) как при частичной, так и при полной потере наблюдений всех спутников текущего созвездия, даже при использовании одной группы приращения между двумя соседними эпохами. При этом рекомендуется использовать одновременно наблюдения шести и более спутников. Надежное решение можно получить на интервалах пропусков наблюдений от 1 до 10 с при одновременном наблюдении шести-семи спутников и на интервалах пропусков до 20 с при одновременном наблюдении не менее восьми спутников.

2) При использовании нескольких групп приращений (накопление данных), надёжность решения значительно повышается. Использование группы из пяти приращений позволяет увеличить допустимый уровень (СКП) шума фазовых наблюдений в 2 – 3 раза для случая полной потери наблюдений, и в 1,5 – 2 раза для случая частичной потери наблюдений.

3) Использование двухчастотной линейной комбинации Wide Lane (фаза разностной частоты) позволяет также существенно уменьшить неопределенность области перебора целочисленных фазовых неоднозначностей. Это дает возможность уменьшить объём вычислительных операций при выполнении перебора. Использование малых объемов выборок наблюдений, а также уменьшение объёма вычислительных операций из-за уменьшения области неопределенности при использовании комбинации Wide Lane, позволяет выполнять обработку и в реальном времени.

Одночастотный случай

1) При использовании кодовых наблюдений без предварительного их сглаживания предложенный метод имеет ограничения его применения, так как позволяет получать надежные оценки циклических фазовых скачков только в случае потери наблюдений за частью спутников текущего созвездия, когда число спутников с непрерывными наблюдениями не менее четырех. При использовании нескольких групп приращений (накопление данных) надёжность решения повышается, но и в этом случае без использования сглаженных кодовых наблюдений удовлетворительная надёжность решения поставленной задачи не достигается, особенно в случае полной кратковременной потери слежения за спутниками. Использование дифференциального режима также является способом повышения качества решения рас-

сматриваемой задачи, поскольку позволяет уменьшить медленно меняющиеся составляющие погрешностей приращений фазовых и кодовых наблюдений. Однако и этот путь не приводит к ожидаемому результату.

2) Определяющим фактором в достижении высокой надёжности решения поставленной задачи является использование сглаженного кодово-фазового координатного решения, что может быть рекомендовано и для случая обработки двухчастотных ГНСС-наблюдений. Применение сглаженных кодовых наблюдений, дифференциального режима и обработки групп приращений позволяет наиболее надёжно восстанавливать непрерывность фазовых наблюдений при полной либо частичной потере слежения за спутниками на интервалах до 30 с при использовании наблюдений шести и более спутников.

Рассмотренный альтернативный метод и реализующие его алгоритмы решения задачи восстановления непрерывности кинематических спутниковых наблюдений практически без изменений могут быть применены к наблюдениям не только спутников GPS, но и других ГНСС: ГЛОНАСС, Galileo, Compass.

Заключение

1. Рассмотрена задача определения потерь счета циклов в одночастотных и двухчастотных фазовых ГНСС-наблюдениях и их исправления (восстановления непрерывности). Описаны результаты разработки и тестирования новых эффективных методов и алгоритмов обнаружения, оценки и исправления фазовых скачков как статических, так и кинематических ГНСС-наблюдений.

2. Рассмотрены два отличающихся метода обработки наблюдений. Первый из них реализует интервальную итерационную процедуру обнаружения и оценки (фиксации) скачков одинарных разностей фаз между парами спутников с последующей их идентификацией на отдельных трассах «спутники – приемник». Этот метод, как показали многочисленные экспериментальные исследования, оказался особенно эффективен для обработки статических наблюдений, а его модификация позволила решить задачу восстановления непрерывности и кинематических фазовых наблюдений.

3. В ходе обработки разреженных наблюдений (темп данных $1/5 - 1/30$ Гц) перманентных референсных IGS/EPN станций предложено использовать все возможные двойные разности наблюдений с целью исключить вариации часов спутников в увеличенных интервалах между эпохами и повышения надежности обнаружения и точности оценки скачков. В этом случае для повышения надежности обработки и идентификации скачков на каждой отдельной трассе «спутник – приемник» в структуру наблюдений станции сети целесообразно включить предварительно обработанные наблюдения станций с темпом данных $1 - 1/5$ Гц.

В ходе обработки кинематических наблюдений с высокой динамикой перед использованием основного метода обнаружения, оценки и устранения фазовых скачков предложено применять предварительную процедуру обработки, которая позволяет оценить и компенсировать динамику наблюдений на трассах «спутники – приемник». С этой целью выполняется точная оценка приращений координат и уходов часов приемника с использованием приращений соседних эпох наблюдений фаз с параллельной отбраковкой возможных фазовых выбросов и скачков.

4. Расширить возможности и повысить надежность устранения фазовых скачков одночастотных и двухчастотных кинематических наблюдений в сложных условиях (разрывы и пропуски наблюдений) позволяет применение другого альтернативного метода решения поставленной задачи. Метод основан на использовании приращений наблюдений по времени и специальной процедуры совместного МНК-оценивания совокупности континуальных (приращений координат и расхождений часов) и дискретных параметров (циклических фазовых скачков). Оценивание циклических фазовых скачков осуществляется прямым перебором в предварительно определённой области поиска. Выполненное тестирование метода с ис-

пользованием реальных ГНСС-наблюдений показало достижение надёжного устранения фазовых скачков при кратковременной полной либо частичной потере наблюдений длительностью до 20 – 30 с.

Список литературы: 1. *Гофманн-Веллингоф, Б.* Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія та практика: пер. з англ. / Б. Гофманн-Веллінгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз ; пер. з англ за ред. Я. С. Яцківа. – Київ : Наук. думка, 1996. – 380 с. 2. *Rizos Chris.* Principles and practice of GPS surveying // School of engineering. The University of New South Wales, Australia, 1999. – 555 p. 3. *Leick, A.* GPS Satellite Surveying, 3-rd ed., John Wiley – New York, 2003. – 464 pp. 4. *Поваляев, А.А.* Спутниковые радионавигационные системы. Время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. – М. : Радиотехника, 2008. – 328 с. 5. *Bock, Ye., Gourevitch, S.A., Counselman, C.C., King, R.W. and Abbot, R.I.* Interferometric analysis of GPS observations // Manuscripta Geodaetica, Springer-Verlag. – 1986. – №11. – P. 282-288. 6. *Bisnath SB* (2000) Efficient, automated cycle-slip correction of dual-frequency kinematic GPS data, Proceedings of ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah, 19-22 Sept., 145-154. 7. *Bisnath SB, Kim D, and Langley RB.* A new approach to an old problem: carrier-phase cycle slips, GPS World, Vol. 12, No. 5, May, 46-51. 8. *Kim, D., Langley RB* (2001). Instantaneous real time cycle-slip correction of dual-frequency GPS data,, Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Alberta, Canada, 5-8 June, 255-264. 9. *Roberts, G.W., Meng, X., Dodson, A.H.* (2002). Using adaptive filtering to detect multipath and cycle slips in GPS/Accelerometer bridge deflection monitoring data, FIG XXII International Congress, TS6.2 Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Washington, D.C. USA, 19-26 April. 10. *Zhalilo, A.A.* Carrier-Phase Cycle-Slip detection and repair of Dual-Frequency GPS data – New Technique using Correlation Filtering Principle // Proceedings of the 10th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg, Russia, 26 – 28 May, 2003. – P. 273 – 276. 11. *Zhalilo, A., Sadanova, N.* Pre-Processing & Analysis software "OCTAVA_PPA": concept, possibilities and features, initial test results, The Proceedings of the 2004 International Symposium on GNSS/GPS, Sydney, Australia, 6–8 December 2004, CD, 17 pp. 12. *Шелковенков, Д.А., Жалило, А.А.* Возможности повышения надёжности обнаружения, оценки и коррекции циклических фазовых скачков двухчастотных наблюдений перманентных GPS-станций в режиме постсеансной обработки // Сб. тр. 2-го Междунар. радиоэлектронного Форума (МРФ-2005) «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Междунар. конф. по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), г. Харьков: ХНУРЭ, 19-23 сентября, 2005 г., Т. 2, С. 544-547. 13. *Жалило, А.А.* Обнаружение и устранение фазовых циклических скачков одночастотных и двухчастотных GPS/GNSS наблюдений – новые универсальный метод и алгоритмы // Тр. XIV-й Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – Санкт-Петербург, Россия, 28-30 мая 2007 г. – С. 293-302. 14. *Zhalilo, A., Shelkovenkov, D.* Features and service performance of multifunctional software toolkit "OCTAVA" for processing and analysis of GPS/GNSS observations, GEOS 2007 Conference Proceedings, Prague, Czech Republic, 1st – 2nd March 2007, pp. 102-110. 15. *Жалило, А.А., Дицкий, И.В.* Новый эффективный метод устранения циклических фазовых скачков двухчастотных кинематических ГНСС-наблюдений // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, №8. – С. 18-28. 16. *Жалило, А.А., Дицкий, И.В.* Устранение циклических фазовых скачков одночастотных кинематических ГНСС-наблюдений // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2012. – Т.55, №8. – С. 40-52.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 23.09.2012