

На правах рукописи

УДК 621.396.933:527.8

НИКИТИН Дмитрий Павлович

# **Повышение точности местоопределения приемника сигналов ГНСС при изменении режима работы**

Специальность 05.12.14 - «Радиолокация и радионавигация»

## **АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2012

Работа выполнена на кафедре 402 «Радиосистемы управления и передачи информации» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент

**Вейцель Андрей Владимирович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор

**Миронов Михаил Аркадьевич**, Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», старший научный сотрудник.

кандидат технических наук

**Аверин Сергей Владиславович**, ООО Топкон  
Позиционинг Системс, начальник математической группы.

**Ведущая организация:** ОАО «Российские космические системы».

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г. на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП, Волоколамское шоссе д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Дата рассылки автореферата: «\_\_\_» июня 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.125.03

к.т.н., доц.

Сычёв М.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена исследованию методов повышения точности определения координат потребителя с применением приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) при возникновении ситуаций изменения режима работы приемника и, соответственно, точности определения позиции приемника. Рассматриваются методы оценки направления движения объекта по измерениям одиночного навигационного приемника с одной антенной при движении на малых скоростях.

### Актуальность темы

С расширением сферы ГНСС, ужесточаются и требования к точности, устойчивости, надежности, накладываемые на оцениваемые навигационным приемником пространственно-временные параметры. Для получения навигационных определений разной точности, приемник настраивают для работы в заданном *режиме* местоопределения. Режим определения координат одиночного приемника по собственным измерениям псевдодальности в литературе называют *режимом абсолютной (автономной) навигации*. Режим определения координат подвижного приемника относительно координат базового приемника по измерениям псевдодальности называют режимом *кодовой дифференциальной навигации*, а по фазовым измерениям режимом *фазовой дифференциальной навигации*. В работе рассмотрено функционирование навигационного приемника в данных режимах местоопределения.

Для решения конкретных задач пользователю необходимо выбрать режим работы навигационного приемника, обеспечивающий требуемые характеристики точности и надежности определяемых параметров. Однако, в реальных условиях навигационная аппаратура потребителя (НАП) часто не способна на все время выполнения целевой задачи функционировать в дифференциальном режиме местоопределения. Это обусловлено влиянием внешней среды распространения сигнала, пропаданием сигнала от базовой станции, затенением большого количества навигационных космических аппаратов (НКА), аномальными ошибками и другими факторами. В таких условиях навигационный приемник может переключаться, например, из режима фазовой дифференциальной навигации (ДН) в абсолютный режим или в режим кодовой ДН, что приводит к получению навигационного решения с более низкими точностными характеристиками. Далее в работе режим фазовой ДН будем называть *высокоточным* режимом местоопределения, а режим абсолютной навигации – *грубым* режимом местоопределения. В свою очередь оценки координат, полученные при решении навигационной задачи в любом режиме местоопределения, до введения дополнительной обработки будем называть *первичными оценками координат*. Переключение режима работы навигационного приемника наряду с изменением рабочего созвездия НКА или с возникновением аномальных измерений неразрывно связано с

резким изменением точности оценок координат приемника, что недопустимо для ряда приложений. При автоматическом управлении сельскохозяйственной и строительной техникой резкое случайное изменение режима местоопределения может привести к выходу из строя управляемого механизма. Возникновение таких ситуаций, как правило, не позволяет продолжать решение целевой задачи пользователя даже при участии оператора в управлении автоматизированным транспортным средством. Внезапное пропадание высокоточного решения наряду с появлением аномальных ошибок или с резким ухудшением условий внешней среды является *нештатной* ситуацией, преодоление которой является одной из актуальных задач повышения точности определяемых пространственных параметров.

В процессе решения широкого круга задач автоматического управления сельскохозяйственными машинами, а также управления системами орошения и удобрения, важным оцениваемым параметром является направление движения сельскохозяйственного транспортного средства в азимутальной плоскости. В таких системах направление движения оценивается с использованием измерений вектора скорости одиночного навигационного приемника с одной антенной. Метод определения направления движения транспортного средства (ТС) с использованием проекций вектора скорости навигационного приемника в ряде случаев, например, при малых скоростях движения или при резком торможении и остановке ТС, обеспечивает недостаточную точность. При уменьшении амплитуды вектора становится практически невозможно оценивать аргумент данного вектора. В то же время, для автоматического управления движущимися ТС, необходимо знание данного параметра. Поэтому задача определения направления движения ТС с заданной точностью при решении вышеуказанных задач является актуальной.

Точность определяемых навигационными приемниками пространственных параметров, зависит как от режима его работы, так и от метода обработки измерений. Эта зависимость проявляется, когда происходит изменение режима работы навигационного приемника. Появление высокоточного режима работы повысит точность местоопределения, но резкое изменение оценки позиции может вывести управляющий техническим средством механизм из строя. Для предотвращения такой ситуации применяются сглаживающие алгоритмы, что уменьшает среднюю точность. Возникает противоречие требований к точности навигационного решения и требований к отсутствию резких выбросов в оценке позиции потребителя, которое приводит к задаче поиска навигационного решения по нескольким критериям (критерию точности и критерию *гладкости*). Разработка количественной меры для оценки навигационного решения по критерию гладкости, которую можно было бы наряду с традиционными мерами точности использовать для выбора наиболее подходящего алгоритма обработки и режима работы, является актуальной задачей.

В целом, решение вышеперечисленных задач является важным направлением исследований, так как оно позволит повысить точность определения пространственных параметров при возникновении нештатных ситуаций (пропадание высокоточного и появление грубого решения), возникающих в процессе решения навигационных задач для широкого круга приложений ГНСС.

## **Научная проблема**

На точность определяемых навигационным приемником пространственных параметров (собственных координат, составляющих вектора скорости и т.д.) большое влияние оказывают условия внешней среды. При временном ухудшении этих условий принимаются специальные меры, позволяющие продолжать определение координат для решения целевой задачи, но с некоторой потерей точности. С этой целью изменяется режим работы навигационного приемника или адаптируются параметры обработки. Такие меры повышают надежность обработки навигационных измерений. Обработка навигационных измерений в хороших условиях описана в теории, имеются рекомендации для синтеза алгоритмов и проектирования систем при некоторых допущениях. Решения, полезные в нештатных ситуациях мало исследованы и практически не затронуты общей теорией оптимизации.

В работе исследуется функционирование приемника сигналов ГНСС в нештатных ситуациях, и разрабатываются обоснованные рекомендации для проектирования навигационных приемников повышенной надежности.

## **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов обработки навигационных измерений (НИ), обеспечивающих повышение точности пространственных параметров, определяемых навигационным приемником, при работе в сложных условиях (затенение большого количества НКА, возмущения в атмосферном слое, возникновение множественных отраженных сигналов) или при возникновении нештатных ситуаций (пропадание сигнала от базовой станции, случайная смена режима работы навигационного приемника, сильные внешние радиопомехи и т.д.). Исходя из цели работы, основными задачами исследований являются:

- анализ существующих методов обработки оценок координат навигационного приемника, полученных при навигационных измерениях, направленных на повышение точности этих оценок (например, применение сглаживающих алгоритмов);
- исследование методов обработки НИ, обеспечивающих решение целевой задачи при пропадании на коротком интервале времени (несколько минут) навигационных определений, полученных с помощью высокоточного режима работы приемника;

- разработка метода, позволяющего продолжать оценку направления движения с заданной точностью при уменьшении значения модуля скорости поступательного движения в одиночном навигационном приемнике с одной антенной;
- проведение с помощью имитационного моделирования и натурных экспериментов анализа методов сглаживания оценок координат навигационного приемника по точностному критерию и критерию гладкости при работе навигационного приемника в условиях случайной смены режимов местоопределения.

#### **Новизна работы заключается в следующем:**

- проведено исследование существующих алгоритмов и методов сглаживания оценок координат навигационного приемника при возникновении нештатных ситуаций и случайной смене режимов работы навигационного приемника в процессе решения навигационной задачи;
- предложен метод обработки измерений, предусматривающий адаптацию сглаживающего фильтра в угломерном канале так, чтобы уменьшение модуля скорости поступательного движения в горизонтальной плоскости при движении объекта не приводило к срыву угловых измерений;
- показано, что мерой гладкости могут служить статистические оценки первой производной по времени от ошибки координатных измерений;
- разработана модель ошибок координат навигационного приемника в режимах абсолютной и дифференциальной навигации с учетом возможной случайной смены режимов работы навигационного приемника, которая позволяет реализовать программы для имитационного моделирования и обосновать методику экспериментов для проверки эффективности предложенных методов.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Применение модифицированного фильтра Калмана при поступлении на него для совместной обработки первичных оценок координат и фазовых приращений координат, имеющих разную точность, позволяет обеспечить повышение точности оценок координат при случайном изменении режима работы навигационного приемника в условиях произвольной динамики движения.
2. Метод адаптации параметров сглаживающего фильтра в канале угла для определения направления движения объекта, включающий сужение полосы в зависимости от измеренного модуля вектора скорости и расширение полосы при обнаружении маневра по углу, позволяет определять направление движения в горизонтальной плоскости при условии, что

среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки измерения не превысит величины 0,6 градусов.

3. Модель ошибок координат навигационного приемника, которая учитывает возможность смены режимов местоопределения, действие собственных шумов приемника, отраженных сигналов, остаточных ошибок ионосферы и изменение рабочего созвездия НКА, позволяет провести имитационное моделирование и выбрать метод обработки первичных оценок координат для проведения натуральных экспериментов.
4. Методика эксперимента, основанная на оценке фактических ошибок местоопределения путем сравнения показаний исследуемого приемника с контрольным приемником в фазовом дифференциальном режиме и ее реализация при статических и кинематических экспериментах в условиях случайной смены режимов работы приемника, позволяет провести натурные эксперименты и подтверждает возможность повышения точности при использовании сглаженных оценок координат по сравнению с первичными оценками в 3 раза по СКО ошибки.

### **Практическая значимость работы**

Предложенные и рассмотренные в работе методы повышения точности и надежности пространственных параметров, определяемых навигационным приемником, реализованы в программном обеспечении и внедрены в навигационную аппаратуру потребителя, выпускаемую компанией Топкон Позиционинг Системс. Предложенный критерий гладкости для оценки качества навигационных решений используется в задачах сельского хозяйства.

### **Апробация работы**

Результаты работы представлены в 8 печатных работах, в том числе в 4 статьях в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ для опубликования результатов кандидатских и докторских диссертаций и доложены автором на двух конференциях, в том числе одной международной.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** к диссертационной работе произведен краткий обзор научной литературы по данной тематике, обосновывается актуальность темы исследований, сформированы цели и задачи исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены общие вопросы построения и применения ГНСС, состав систем, приведено краткое описание отечественной системы ГЛОНАСС и зарубежных ГНСС, приведены основные сравнительные характеристики, выполнена классификация НАП. Освещен круг задач,

решаемых с помощью ГНСС, проблемы, возникающие при работе навигационной аппаратуры в реальных условиях. Рассмотрены основные виды ошибок местоопределения:

- ошибки навигационной системы;
- ошибки, связанные с распространением сигнала;
- ошибки приемной аппаратуры.

Представлены основные режимы местоопределения – абсолютное автономное местоопределение и дифференциальное местоопределение. Под абсолютным автономным местоопределением понимается определение абсолютного местоположения навигационного приемника, используя только его собственные измерения. При этом в общем случае используются только кодовые измерения навигационного приемника. Ошибки местоопределения в таком режиме могут достигать десятков метров. Дифференциальное местоопределение производится относительно другой точки, обычно с точно известными координатами, требует наличия еще одного навигационного приемника, находящегося в этой точке (так называемой базовой станции), и канала передачи корректирующей информации. Используя совместную обработку измерений базового и подвижного приемников, потребитель получает возможность точнее определять свои относительные координаты за счет компенсации значительной части сильно коррелированных ошибок.

Режим дифференциальной навигации (ДН), основанный на измерениях псевдодальностей, называют кодовым дифференциальным режимом (в англоязычной литературе Differential GPS - DGPS). Он позволяет достигать метровой точности местоопределения. Дифференциальный режим работы по фазовым измерениям в реальном времени (в англоязычной литературе Real Time Kinematic - RTK), обеспечивает сантиметровую точность определения координат приемника, что является приемлемым для большинства современных приложений.

В главе освещены причины, по которым может происходить резкое ухудшение точности местоопределения или непреднамеренное переключение работы приемника из более высокоточного режима местоопределения в более грубый режим:

- возникновение переотраженных сигналов (эффект многолучевости) и даже их захват при отсутствии прямого сигнала;
- частые потери сигналов от НКА;
- перескоки в системе фазовой автоподстройки частоты (ФАП);
- невозможность отслеживания сигнала одного и того же НКА в течение времени, необходимого для сглаживания кодовых измерений фазовыми;
- сильное возмущение в ионосферном слое (ионосферные вихри);
- возникновение аномальных ошибок;
- потеря сигнала базовой станции.

Для компенсации влияния этих факторов применяют различные методы, в том числе:

- использование дополнительной внешней информации от инерциальных модулей или других радиотехнических систем;
- сглаживание кодовых измерений псевдодальностей с помощью фазовых измерений, применяя различные фильтры;
- применение специальной опорной стробовой последовательности для уменьшения ошибок, порождаемых многолучевостью;
- сглаживание первичных оценок координат приемника.

Показана актуальность повышения точности местоопределения без применения внешних измерительных модулей, а с помощью дополнительной программной обработки оценок координат.

Рассмотрены известные методы повышения точности местоопределения с применением теории фильтрации, используемые ведущими мировыми производителями навигационной аппаратуры. Однако существующие методы адаптированы под конкретные режимы работы навигационного приемника или определенные задачи. Поэтому при возникновении нештатных ситуаций, случайной смене режима местоопределения или если реальное движение приемника не соответствует выбранной модели движения, могут возникать большие ошибки в оценках сглаженных координат.

Для некоторых специфических приложений (обработка полей в сельском хозяйстве) широко используются приращения фазовых измерений для определения приращений координат за некоторый интервал времени даже в одиночном приемнике. Известно, что фазовые измерения являются неоднозначными и не могут быть использованы для решения навигационной задачи в одиночном приемнике напрямую, однако, в отсутствии срывов слежения за НКА в приращениях фазовых измерений эти неоднозначности можно исключить. После этого с использованием приращений фазовых измерений, вычисленных за некоторый промежуток времени, может быть решена навигационная задача и получены *фазовые приращения координат* навигационного приемника за это время. Метод фазовых приращений координат широко используется только в задачах, где необходима высокая точность местоопределения относительно начальной точки.

Таким образом, существующие методы при работе навигационного приемника в нештатных ситуациях и при случайной смене его режима работы не позволяют получить оценки координат потребителя с необходимой точностью и надежностью.

Освещены проблемы оценки направления движения объекта для задач сельского хозяйства и дорожного строительства по измерениям одиночного навигационного приемника с одной антенной при движении ТС на малых скоростях (1-3 км/ч).

**Вторая глава** посвящена разработке методов для повышения точности определения координат навигационного приемника и направления движения ТС. Для этого была поставлена и решена задача совместной фильтрации первичных оценок координат и фазовых приращений координат, а также задача адаптивной фильтрации направления (угла) движения ТС в азимутальной плоскости с использованием математического аппарата, опирающегося на марковскую теорию оценивания случайных процессов. Для совместной обработки первичных оценок координат и фазовых приращений координат в работе были записаны уравнения фильтра Калмана (ФК).

Фазовые приращения координат навигационного приемника в работе определяются с помощью решения навигационной задачи по приращениям фазовых измерений с использованием метода наименьших квадратов (МНК). Оценки фазовых приращений координат:

$$\Delta \mathbf{X}^* = \begin{bmatrix} \Delta x_{\varphi, k}^* \\ \Delta y_{\varphi, k}^* \\ \Delta z_{\varphi, k}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_k \\ \Delta y_k \\ \Delta z_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{\Delta x, k} \\ \xi_{\Delta y, k} \\ \xi_{\Delta z, k} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где:

$\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k$  - истинные приращения координат;

$\xi_{\Delta x, k}, \xi_{\Delta y, k}, \xi_{\Delta z, k}$  - ошибки оценивания приращений координат (считаем их случайными и независимыми гауссовскими процессами).

Учитывая шумовые составляющие ошибок местоопределения и возможное наличие разрывов первого рода в первичных оценках координат, в работе были записаны уравнения модели поведения ошибок оценок координат в виде гауссовского марковского процесса с помощью формирующего фильтра.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{x, k+1} \\ \varepsilon_{y, k+1} \\ \varepsilon_{z, k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{x, k} \\ \varepsilon_{y, k} \\ \varepsilon_{z, k} \end{bmatrix} \cdot f_{\varepsilon} + \gamma_{\varepsilon, k} \cdot n_{\varepsilon, k},$$

где

$f_{\varepsilon} = e^{-\alpha \cdot \Delta t}$  - характеризует полосу формирующего фильтра и зависит от времени корреляции процесса;

$\gamma_{\varepsilon, k}$  - величина ошибки оценки координаты, зависит от наличия или отсутствия разрыва первого рода в оценке координат в текущий момент времени и считается для всех координат одинаковой.

$n_{\varepsilon, k}$  - независимые БГШ формирования;

Для определения оценки величины ошибки  $\gamma_{\varepsilon, k}$  используется метод обнаружения разрыва первого рода в первичных оценках координат. В частности, простым и квазиоптимальным методом является метод обнаружения разрывов первого рода по значению первой производной от

первичных оценок координат навигационного приемника. Если значение производной превосходит некоторый заданный порог, считается, что произошел разрыв функции.

Вектор состояния имеет следующий вид:

$$\mathbf{X} = [x, \varepsilon_x, y, \varepsilon_y, z, \varepsilon_z]^T.$$

Далее в работе, согласно методу распределения информации, используется отдельная фильтрация первичных оценок координат и записаны уравнения ФК для одной координаты (например, координаты  $x$ ). При этом для остальных координат уравнения ФК записываются аналогичным образом.

В таком случае, рассматриваемый вектор состояния примет вид:

$$\mathbf{X} = [x, \varepsilon_x]^T.$$

Модель изменения координаты  $x$  приемника в динамике с учетом фазовых приращений координат будет иметь вид:

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_{\varphi, k}^* - \xi_{\Delta x, k}.$$

Наблюдениями (измерениями) в данном случае считаются первичные оценки координат приемника, а уравнения наблюдения и состояния примут вид:

$$y_k = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_k + \sigma_y \cdot n_{y, k},$$

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{\Phi}_{xx} \cdot \mathbf{X}_k + \mathbf{\Gamma}_{xx, k} \cdot n_{\varepsilon, k},$$

где:  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  - матрица перехода;  $\mathbf{\Gamma}_{xx, k} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta\varphi}^2 \\ \gamma_{\varepsilon, k} \end{bmatrix}$  - матрица шумов формирования;  $\mathbf{\Phi}_{xx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_{\varepsilon} \end{bmatrix}$  -

матрица состояния;  $\sigma_y$  - СКО шумовых ошибок МНК;  $n_{y, k}$  - независимые белые гауссовы шумы (БГШ) наблюдения;  $\sigma_{\Delta\varphi}^2$  - дисперсия оценки фазовых приращений координат.

Уравнения ФК для совместной обработки первичных оценок координат и фазовых приращений координат, записанного для координаты  $x$  будут иметь следующий вид:

$$\mathbf{X}_{k+1}^* = \mathbf{X}_{k+1|k}^* + \mathbf{K}_{k+1} \cdot [y_{k+1} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_{k+1|k}^*]$$

$$\mathbf{X}_{k+1|k}^* = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{X}_k^* + [\Delta x_{\varphi, k+1}^*, 0]^T$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1|k} \cdot \mathbf{H}^T \cdot [\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_{k+1|k} \cdot \mathbf{H}^T + \sigma_y^2]^{-1}, \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{P}_k \cdot \mathbf{\Phi}^T + \mathbf{\Gamma}_{k+1} \cdot \mathbf{\Gamma}_{k+1}^T$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \cdot \mathbf{H}] \cdot \mathbf{P}_{k+1|k}$$

Фильтр Калмана, согласно теории фильтрации, позволяет получить оптимальную по критерию минимума среднего квадрата ошибки оценку сглаженных координат при условии некоррелированных во времени измерений, наличия в измерениях помех в виде БГШ. В

реальности в условиях наличия разрывов первого рода и коррелированных ошибок измерений ФК не обеспечивает оптимальную по критерию минимума среднего квадрата ошибки оценку наблюдаемого процесса.

Выражения (2), описывающие ФК достаточно трудоемки при реализации и с учетом некоторых допущений могут быть упрощены. Если предположить, что ошибки оценивания фазовых приращений координат с помощью МНК и ошибки первичных оценок координат, имеют постоянные статистические характеристики ошибок (СКО и математическое ожидание (МО)), можно не оценивать медленно меняющиеся ошибки координатных измерений. Это упрощает реализацию ФК, что обусловлено уменьшением вектора состояния – не оценивается величина  $\varepsilon_{x,k}$ .

При этом фильтр для координаты  $x$  записывается в скалярном виде следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{k+1}^* &= x_{k+1|k}^* + \alpha_{k+1} \cdot [y_{k+1} - x_{k+1|k}^*] \\ x_{k+1|k}^* &= x_k^* + \Delta x_{\varphi, k+1}^* \\ \alpha_{k+1} &= \frac{(\sigma_{x^*,k}^2 + \sigma_{\Delta\varphi}^2)}{(\sigma_{x^*,k}^2 + \sigma_{\Delta\varphi}^2) + \sigma_y^2}, \\ \sigma_{x^*,k+1}^2 &= [1 - \alpha_{k+1}] \cdot (\sigma_{x^*,k}^2 + \sigma_{\Delta\varphi}^2) \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $\alpha$  - коэффициент фильтра;  $\sigma_{x^*,k}^2$  - второй центральный момент сглаженной оценки.

Выражения (3) описывают ФК для координаты  $x$ . Точность результирующей оценки, обусловленная постоянным уменьшением коэффициента  $\alpha$ , будет с каждым следующим моментом времени улучшаться, что эквивалентно сужению полосы фильтра, до значения, характеризуемого точностью фазовых приращений координат. Это позволяет уменьшать шумовые ошибки, но фильтр становится нестабильным и плохо реагирует на изменение наблюдаемой величины при не соответствии поведения реального процесса и поведения фазовых приращений координат. Через некоторое время работы фильтр будет слабо реагировать на первичные оценки координат, поступающие на вход, а будет использовать экстраполированную оценку, чтобы оценить текущее значение координаты  $x$ . Для сохранения устойчивости фильтра и обеспечения высоких точностных характеристик навигационного решения, коэффициент фильтра в работе ограничен нижним порогом.

В работе проведен анализ нескольких вариантов совместных сглаживающих фильтров, в том числе основанных на использовании ФК, для условий изменения режима работы навигационного приемника:

1. Сглаживание для любого режима работы навигационного приемника с помощью фильтра первого порядка астатизма с фиксированным коэффициентом фильтра и подачей целеуказаний от фазовых приращений координат. Блок-схема такого фильтра представлена на

рисунке 1. Рекуррентные уравнения фильтра для одной из координат, например для координаты  $x$ , записываются следующим образом:

$$\tilde{x}_{k+1} = (1 - \alpha) \cdot (\tilde{x}_k + \Delta x_{k+1}) + x_{k+1} \cdot \alpha,$$

где:  $x_{k+1}$  - первичная оценка координаты;  $\Delta x_{k+1}$  - приращение координаты;  $\alpha$  - коэффициент фильтра.

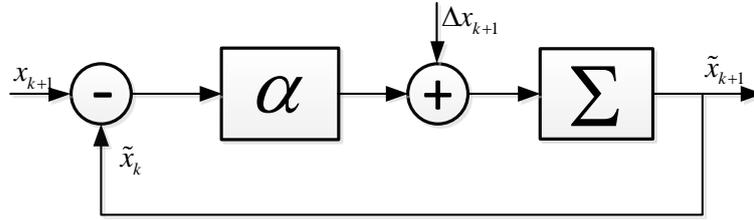


Рисунок 1 - Блок – схема фильтра первого порядка с целеуказаниями.

2. Фильтр с целеуказаниями от фазовых приращений координат, аналогичный варианту 1, но с изменением коэффициента фильтра в зависимости от точности первичных оценок координат. Коэффициент фильтра подбирается для каждого режима местоопределения исходя из значений СКО оценок первичных координат.
3. Фильтр первого порядка астатизма с целеуказаниями от фазовых приращений координат с учетом изменения коэффициента фильтра для каждого режима. Также в фильтре находится нелинейный элемент, на который подается сигнал рассогласования, и переключатель, с помощью которого размыкается фильтр при условиях, когда происходит непреднамеренная смена режима позиционирования с более точного на более грубый. Блок-схема фильтра представлена на рисунке 2. Рекуррентные уравнения фильтра:

$$x_{k+1}^{pr} = \tilde{x}_k + \Delta x_{k+1},$$

$$\delta = x_{k+1} - x_{k+1}^{pr},$$

$$\delta = \begin{cases} -v n p u & \delta < -h \\ \delta n p u & -h < \delta < h, \\ v n p u & h < \delta \end{cases}$$

где:  $h$  - значение порога, для каждого режима свое;  $v$  - значение, определяемое видом нелинейного элемента;  $\lambda$  - функция, характеризующая размыкание сглаживающего контура. Если режим работы навигационного приемника между  $k$  и  $k+1$  моментами времени не изменился, либо изменился с более грубого на более точный, то  $\lambda = 1$ . Если же режим работы навигационного приемника сменился на более грубый, то  $\lambda = 0$  до появления более точного решения.

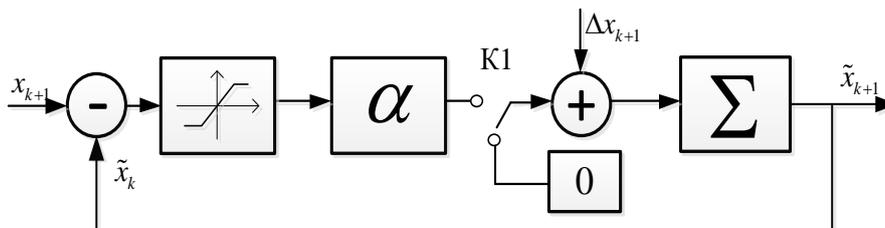


Рисунок 2 - Блок – схема нелинейного адаптивного фильтра с целеуказаниями.

В главе также предложен метод фильтрации первичной оценки направления движения объекта, целью которого является получение сглаженной оценки. Для этого был модифицирован ФК. Блок-схема алгоритма работы такого модифицированного ФК представлена на рисунке 3.

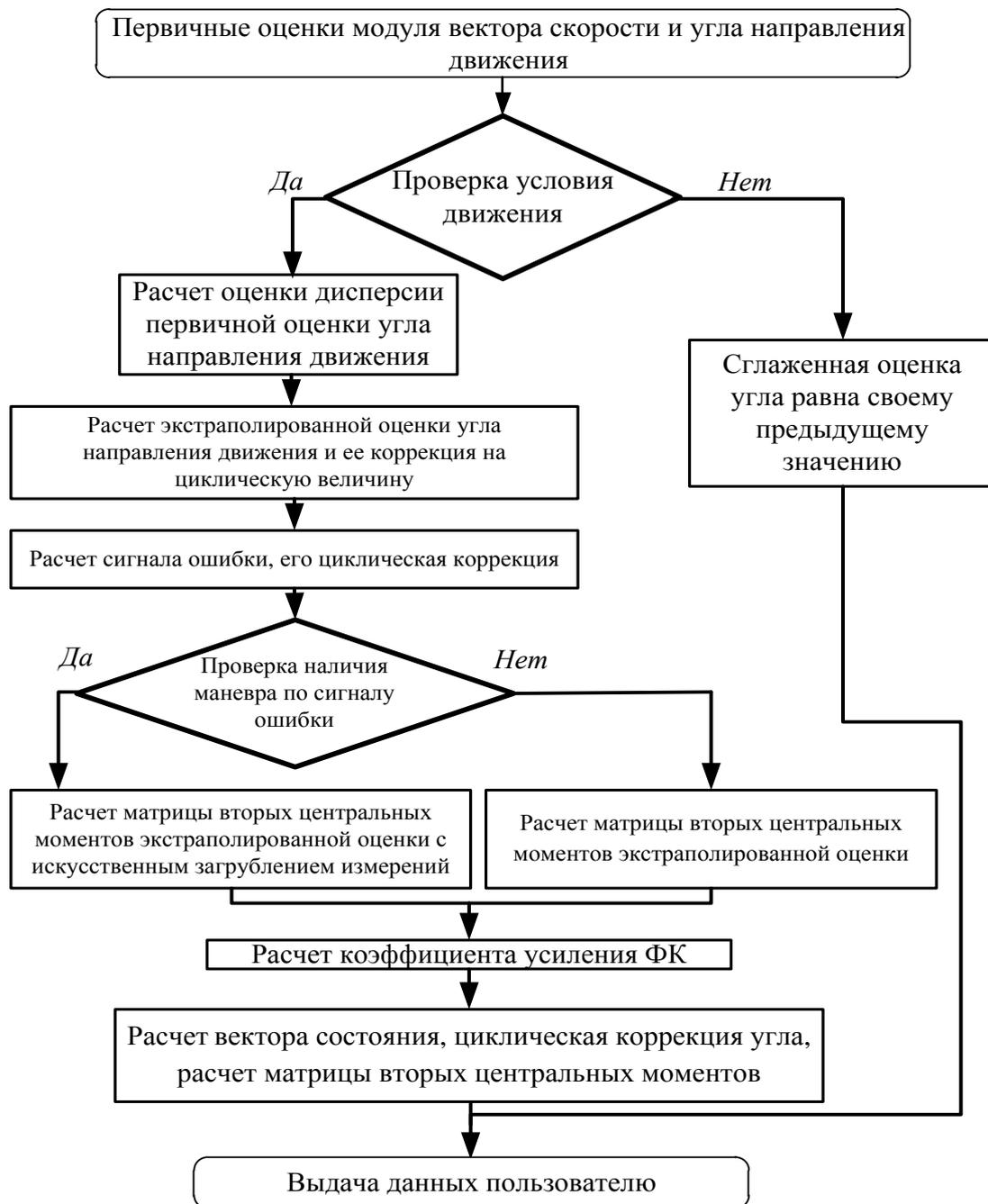


Рисунок 3 - Блок – схема алгоритма работы модифицированного ФК для фильтрации оценки направления движения.

Введен критерий *гладкости* для оценки качества навигационного решения и численная характеристика его оценки. Критерий основан на оценке скорости изменения ошибки - чем медленнее меняется ошибка, тем решение более гладкое и является более подходящим для ряда задач. В качестве величины, характеризующей качество решения по критерию гладкости, предлагается использовать значение дисперсии первой производной по времени от ошибки

местоопределения. Первая производная по времени от ошибки местоопределения характеризует скорость изменения ошибки во времени и чем меньше ее дисперсия, тем медленней меняется ошибка.

**В третьей главе** выбрана имитационная среда и проведено имитационное моделирование для набора статистических данных, проверки работоспособности сглаживающих фильтров и выбора их параметров. Выполнен анализ конечного множества сглаживающих фильтров по заданным критериям (критериям точности и гладкости) и выбран один из них, который далее был проверен на реальных навигационных данных. Для этого были созданы модели изменения координат в условиях непреднамеренного переключения режимов работы навигационного приемника, получены первичные оценки координат, затем они были обработаны анализируемыми сглаживающими фильтрами и получены сглаженные оценки координат. При разработке имитационных моделей для получения навигационных решений в режимах абсолютной, кодовой дифференциальной и фазовой дифференциальной навигации было рассмотрено влияние различных некомпенсируемых или плохо компенсируемых ошибок местоопределения. При этом ошибки местоопределения были разделены на три класса:

- шумовые ошибки (шумовые ошибки измерений), которые были смоделированы с использованием датчика случайных чисел с нормальным распределением в виде БГШ;
- медленно меняющиеся ошибки местоопределения (многолучевость, ионосфера и т.д.), для моделирования которых был выбран гауссовский марковский случайный процесс, для реализации был использован формирующий фильтр;
- разрывы первого рода, связанные с изменением рабочего созвездия НКА, эфемеридной информации и т.д.

С учетом наличия медленных ошибок и возможного возникновения разрывов первого рода модель ошибок примет вид:

$$\xi_{k+1} = \xi_k \cdot e^{-\alpha \tau} + \lambda \cdot n, \quad (4)$$

где:  $\alpha$  - коэффициент формирующего фильтра, характеризующий период колебаний медленных ошибок, для времени корреляции 1000 секунд, он равен 0,001;  $\tau$  - период поступления измерений;  $\lambda$  - величина, определяющая наличие разрыва первого рода, при наличии разрыва эта величина равна  $\lambda = \sigma_\xi$ , при отсутствии разрыва -  $\lambda = \sigma_\xi \cdot \sqrt{1 - (e^{-\alpha \tau})^2}$ , ( $\sigma_\xi$  - стационарное значение СКО ошибки оценивания координат;  $n$  - отсчеты БГШ).

При работе в дифференциальных режимах местоопределения в модели рассматривается влияние шумовой ошибки и ошибками, порождаемыми наличием переотраженных сигналов. При этом сделано предположение, что базовая станция находится в пределах нескольких километров и ионосферная ошибка при формировании разностных измерений вычитается как сильно

коррелированная ошибка. Также в моделях учитывается ошибка, порождаемая неточностью самого метода решения навигационной задачи. Например, в реальной аппаратуре для поддержания высокой производительности при решении нелинейных систем уравнений с помощью линеаризации в окрестности априорной точки часто ограничиваются одной итерацией, что ведет к возникновению дополнительной ошибки оценивания координат. В модели данная ошибка задается в виде БГШ с заданной дисперсией.

Таким образом, оценка координат для имитационного моделирования в режиме абсолютного местоопределения, кодового дифференциального и фазового дифференциального местоопределения на  $k$ -ый момент времени:

$$\begin{aligned} x_{\rho, st, k}^* &= x_k + \xi_{k, st} + \sigma_{st} \cdot n_{k, st \ln} \\ x_{\rho, cd, k}^* &= x_k + \xi_{k, cd} + \sigma_{cd} \cdot n_{k, dgps} , \\ x_{\varphi, rtk, k}^* &= x_k + \xi_{k, rtk} + \sigma_{rtk} \cdot n_{k, rtk} \end{aligned} \quad (5)$$

где:  $\sigma_{st}$ ,  $\sigma_{cd}$ ,  $\sigma_{rtk}$  - СКО ошибок методов оценивания координат;  $n_{k, st \ln}$ ,  $n_{k, dgps}$ ,  $n_{k, rtk}$  - отсчеты БГШ.

В таблице 1 приведены СКО ошибок координат и полосы формирующего фильтра, выбранные при моделировании навигационных решений рассматриваемых режимов работы навигационного приемника. Был проведен анализ поведения ошибок, вносимых задержками в ионосферном слое и порождаемых переотраженными сигналами. Исходя из этого в модели время корреляции медленной ошибки, порождаемой многолучевостью, задано равным 100 секунд, а медленной ошибки, порождаемой многолучевостью и ионосферой – 1000 секунд.

Таблица 1 Параметры для моделирования ошибок оценок координат в различных режимах.

Режим работы навигационного приемника	Параметр		
	СКО ошибок оценивания, м	СКО ошибок метода расчета, м	Параметр формирующего фильтра $\alpha$
Абсолютный режим	$\sigma_{\xi} = 1,2$	$\sigma_{st} = 0,1$	0,001
Кодовый дифф. режим	$\sigma_{\xi} = 0,6$	$\sigma_{cd} = 0,05$	0,01
Фазовый дифф. режим	$\sigma_{\xi} = 0,01$	$\sigma_{rtk} = 0,001$	0,01

На рисунках 4 – 6 представлены ошибки смоделированных координат в режимах абсолютного местоопределения, кодового дифференциального и фазового дифференциального позиционирования, соответственно.

Для создания имитационной модели приращений координат были рассмотрены шумовые ошибки приращений координат, обусловленные фазовыми шумами. Приращение остальных ошибок настолько мало по сравнению с шумовой составляющей ошибки, что за

непродолжительный интервал времени не сказывается на приращениях координат. Для моделирования фазовых приращений координат был выбран Винеровский процесс.

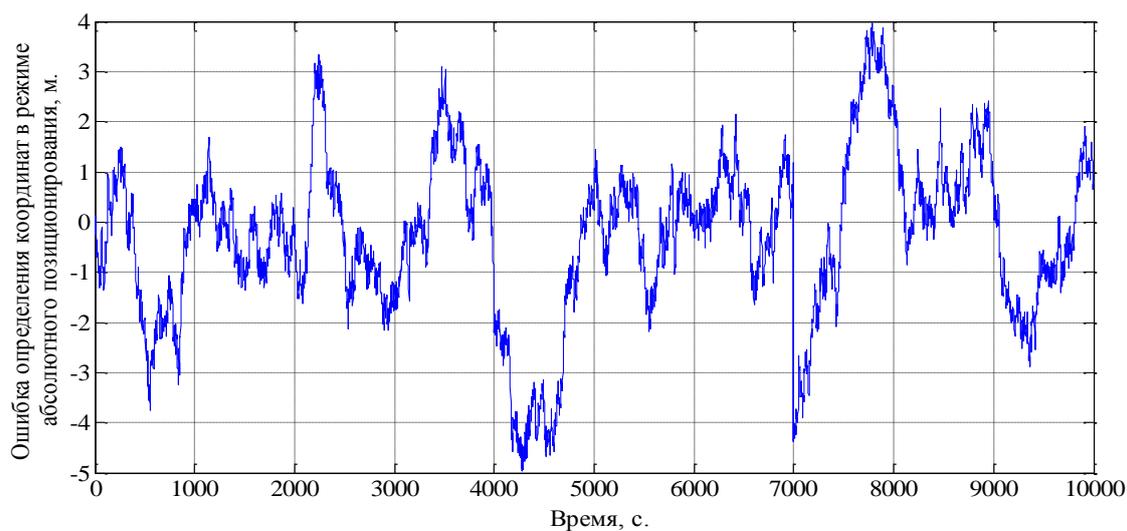


Рисунок 4 - Ошибки определения координат в абсолютном режиме.

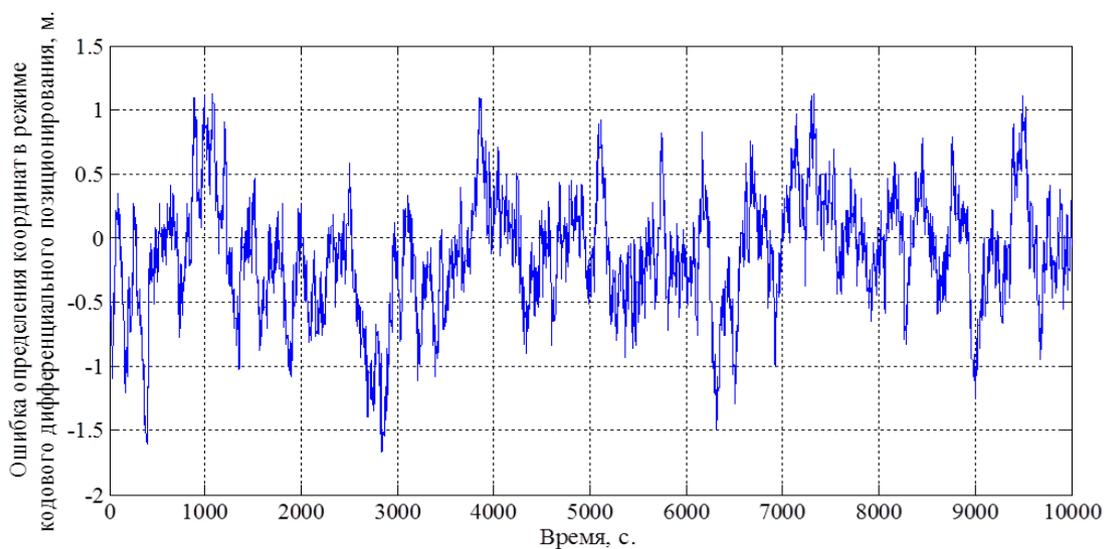


Рисунок 5 - Ошибки определения координат в кодовом дифференциальном режиме.

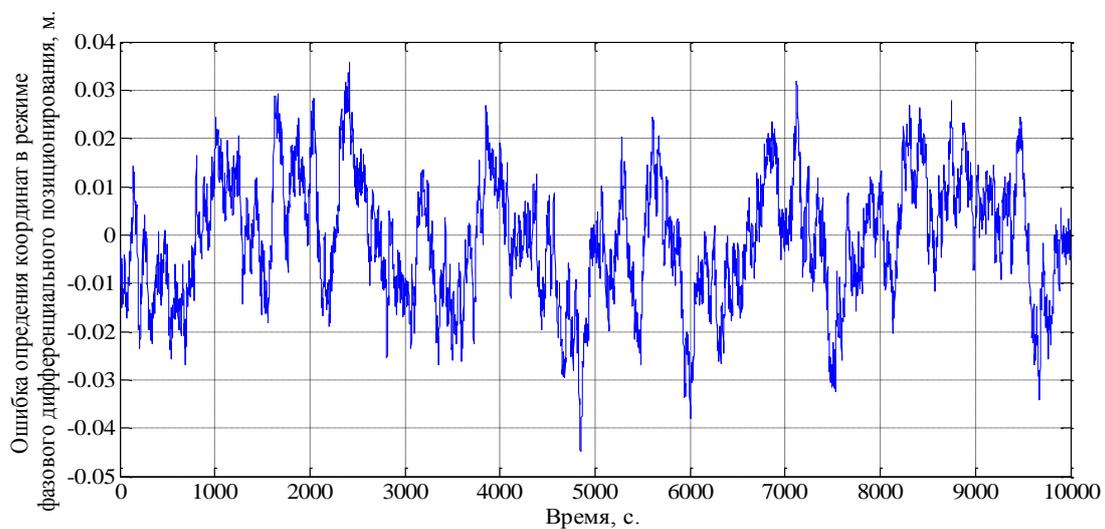


Рисунок 6 - Ошибки определения координат в фазовом дифференциальном режиме.

На рисунке 7 показан пример реализации ошибки определения фазовых приращений координат в зависимости от времени.

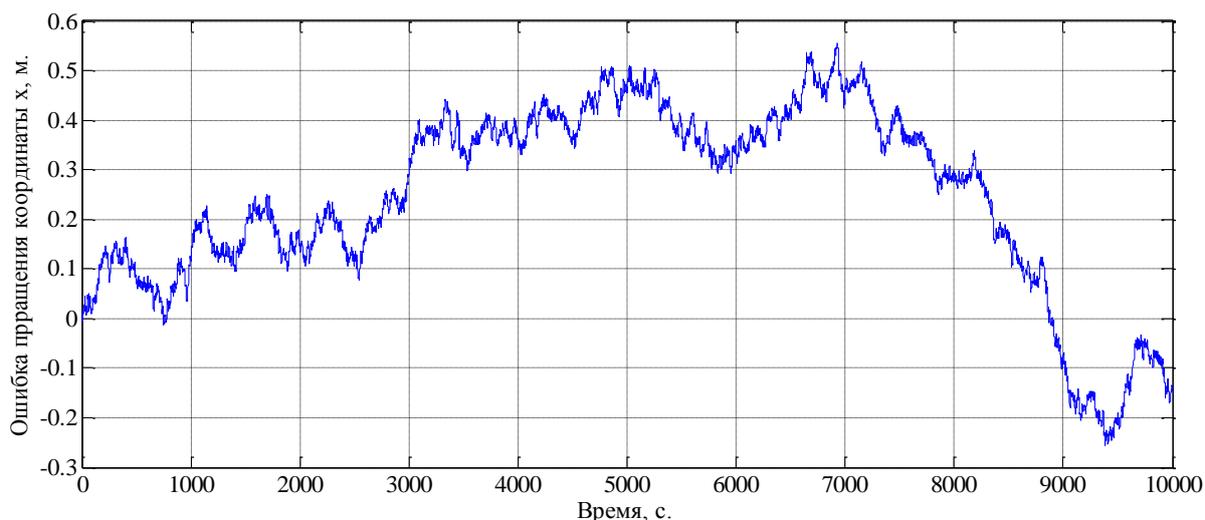


Рисунок 7 - Ошибки фазовых приращений координат.

Для получения реализации координат в условиях случайной смены режимов работы навигационного приемника был задан сценарий последовательной смены навигационных решений в разных режимах местоопределения. Было проведено 1000 экспериментов с моделированием реализаций первичных оценок координат и фазовых приращений координат, длительностью 10000 секунд. Далее по заданному сценарию имитировалась смена режимов работы навигационного приемника, была произведена обработка первичных оценок координат с помощью анализируемых сглаживающих фильтров, получена оценка сглаженных координат, проведен выбор методом анализа сглаживающего фильтра по критерию точности.

В таблицах 2 и 3 приведены средние по 1000 экспериментам значения ошибок оценок координат и значения первой производной от ошибки оценки координат, соответственно.

Таблица 2 Статистических характеристики ошибок оценки координат.

Статистические характеристики ошибок	Виды обработки			
	Первичные оценки координат	Фильтр с постоянной полосой	Фильтр с переменной полосой	Адаптивный нелинейный фильтр
СКО, м	1,706	0,778	0,693	<b>0,436</b>
МО, м	0,016	0,014	0,008	<b>0,004</b>

Таблица 3 Статистические характеристики первой производной от ошибок оценок координат.

Статистические характеристики ошибок	Виды обработки			
	Первичные оценки координат	Фильтр с постоянной полосой	Фильтр с переменной полосой	Адаптивный нелинейный фильтр
СКО, м	0,115	0,005	0,016	<b>0,005</b>
МО, м	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	<b><math>3,9 \cdot 10^{-7}</math></b>

На рисунках 8 и 9 показаны примеры реализации ошибок первичной оценки координат при случайной смене режима работы навигационного приемника и результаты ошибок сглаженных оценок для двух из 1000 смоделированных реализаций. По результатам имитационного моделирования, представленным в таблицах 2 - 3 и на рисунках 8 - 9 методом анализа был выбран адаптивный нелинейный фильтр для проведения натурных экспериментов.

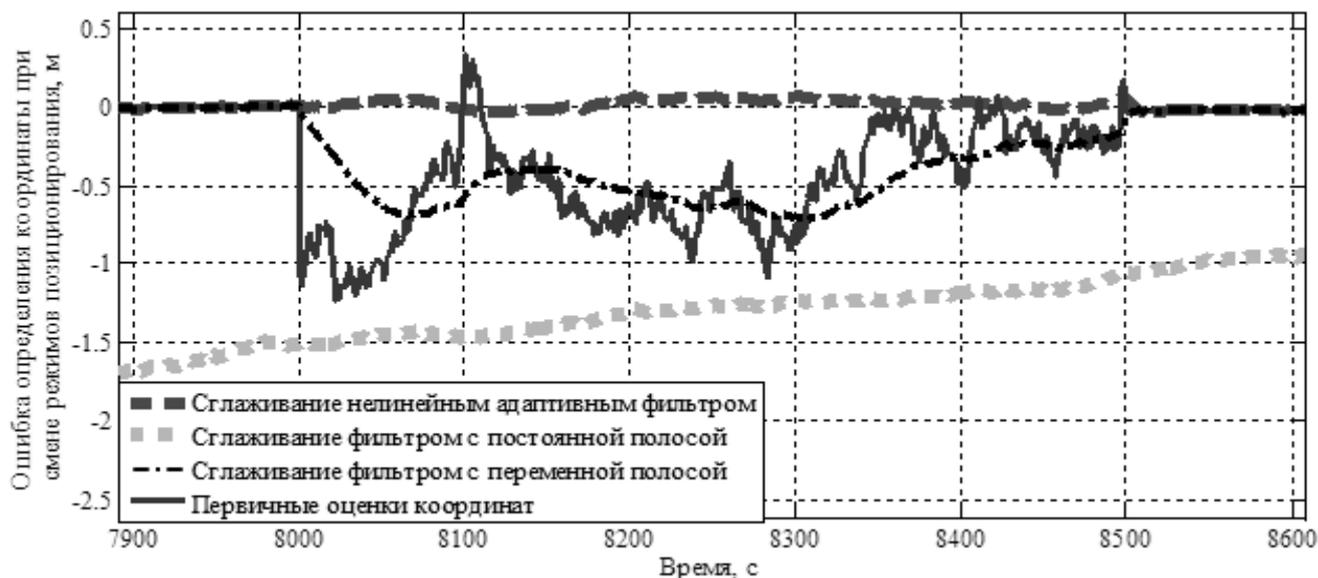


Рисунок 8 - Ошибки первичных и сглаженных оценок координат, эксперимент № 1.

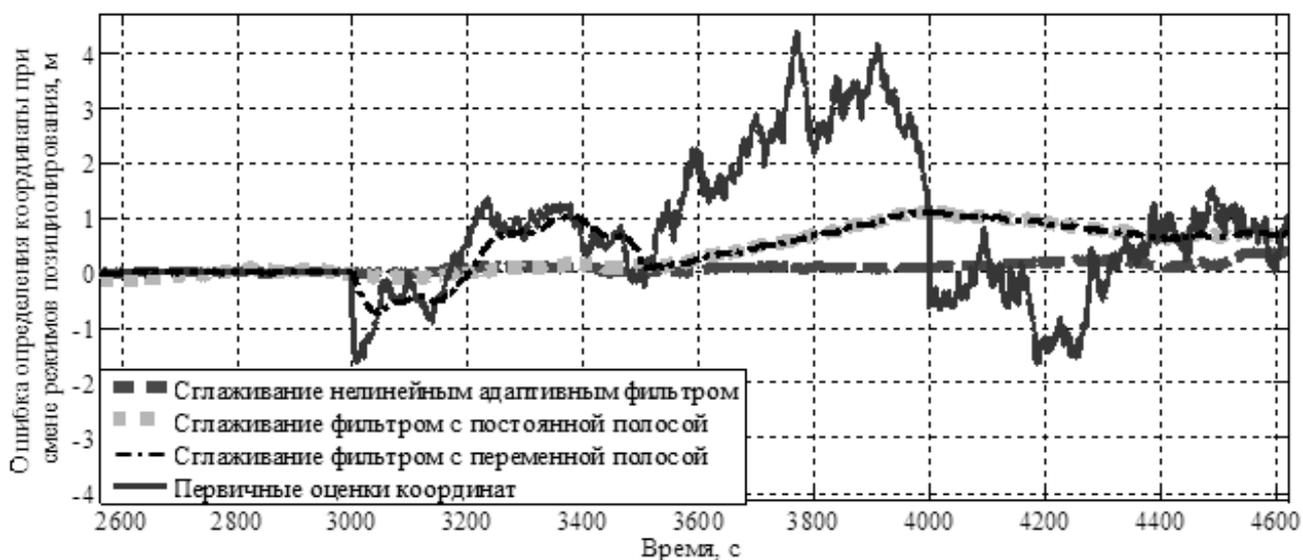


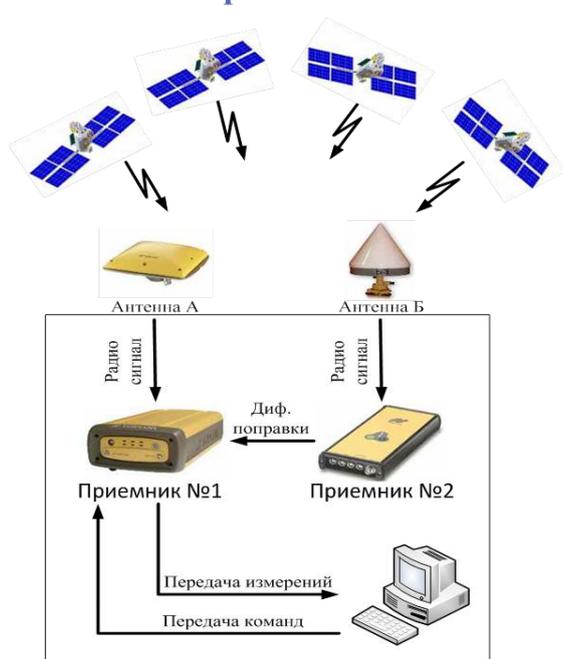
Рисунок 9 - Ошибки первичных и сглаженных оценок координат, эксперимент № 2.

Результаты проведенного имитационного моделирования показывают целесообразность применения сглаживающих фильтров для увеличения точности местоопределения при условии случайного переключения режимов работы навигационного приемника.

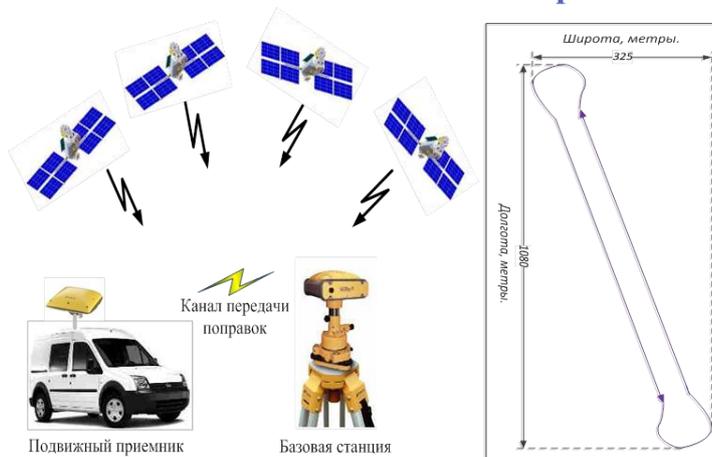
**В четвертой главе** приведены результаты натурального экспериментального исследования выбранного адаптивного нелинейного сглаживающего фильтра в сравнении с первичными оценками координат в условиях статического и кинематического положения приемника. Для этого

была разработана схема и методика проведения эксперимента. В статике в режиме реального времени на приемник №1, расположенный на крыше здания офиса компании Топкон Позитионинг Системс по интернету передавались дифференциальные поправки с приемника №2, расположенного на крыше одного из корпусов МАИ. Поправки передавались в формате RTCM и позволяли работать приемнику №1 в кодовом и в фазовом дифференциальном режимах. Приемник №1 был подключен к компьютеру для подачи команд управления и записи навигационных измерений. Непроизвольная смена режимов работы навигационного приемника была произведена с помощью подачи специальных команд конфигурации приемнику №1. Опорные координаты антенн в статике известны с высокой точностью, достаточной для расчета ошибок местоопределения. Таким образом, был проведен статический эксперимент длительностью более 70000 секунд и по нему оценены статистические характеристики первичных и сглаженных с помощью выбранного фильтра оценок координат. Эксперименты в кинематике были поставлены схожим образом. На автомобиле был закреплен навигационный приемник, который с помощью специальных команд изменял режимы своей работы и записывать измерения во внутреннюю память. Автомобиль совершал множественные проезды по представленной на рисунке 10 траектории. В качестве опорной траектории выступали решения режима фазовой дифференциальной навигации, обеспечиваемого приемником, подключенным к той же антенне что и подвижный приемник. Базовая станция находилась в пределах единиц километров.

### Постановка статических экспериментов



### Постановка кинематических экспериментов



### Схема крепления приемников на автомобиле



Рисунок 10 - Схема проведения и траектория движения для кинематических экспериментов.

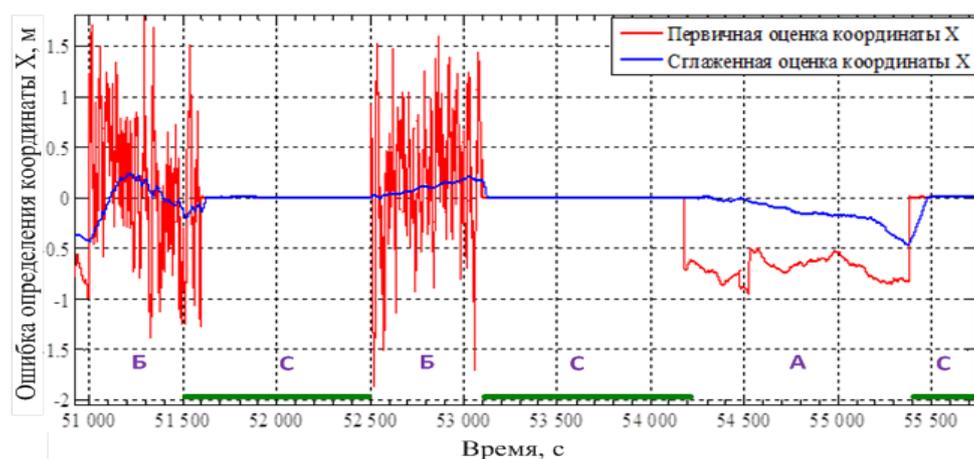
Статистические характеристики ошибок местоопределения при проведении натуральных экспериментов в статике и кинематике для первичных и сглаженных оценок координат представлены в таблицах 4 и 5, соответственно. На рисунках 11, 12 показаны ошибки местоопределения по координате X для одного из экспериментов в статике и кинематике соответственно.

Таблица 4 Значения ошибок местоопределения для статических экспериментов.

Статистические характеристики ошибок	Первичные оценки координат			Сглаженные оценки координат		
	X	Y	Z	X	Y	Z
МО, м	<b>-0,355</b>	<b>-0,176</b>	<b>-0,264</b>	<b>-0,077</b>	<b>-0,040</b>	<b>-0,197</b>
СКО, м	<b>0,815</b>	<b>0,541</b>	<b>1,525</b>	<b>0,252</b>	<b>0,184</b>	<b>0,631</b>

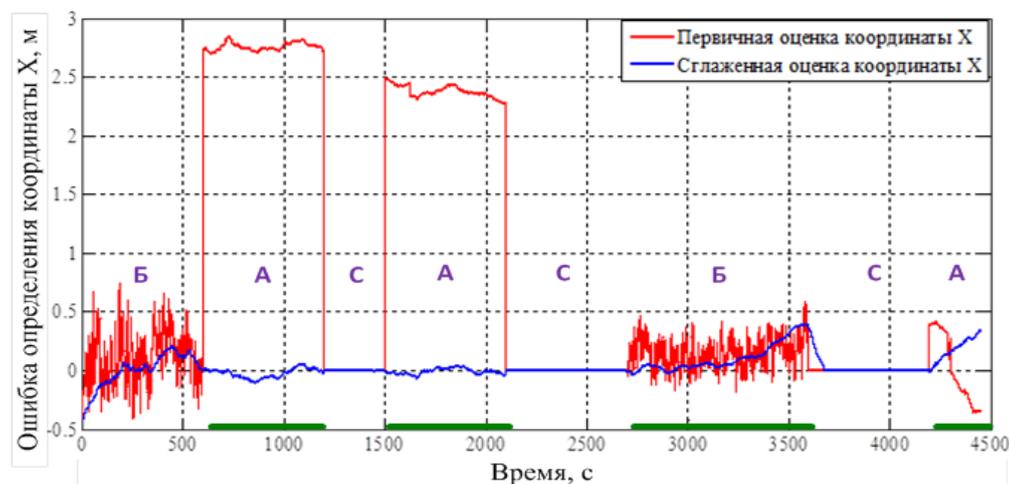
Таблица 5 Значения ошибок местоопределения для кинематических экспериментов.

Статистические характеристики ошибок	Первичные оценки координат			Сглаженные оценки координат		
	X	Y	Z	X	Y	Z
МО, м	<b>0,738</b>	<b>0,3</b>	<b>0,711</b>	<b>0,033</b>	<b>0,015</b>	<b>0,1</b>
СКО, м	<b>1,120</b>	<b>0,455</b>	<b>1,170</b>	<b>0,100</b>	<b>0,060</b>	<b>0,1</b>



Зоны действия режимов местоопределения:  
 «А» - режим абсолютного местоопределения;  
 «Б» - режим кодового дифференциального местоопределения;  
 «С» - режим фазового дифференциального местоопределения.

Рисунок 11 - Ошибка оценки координаты X для части статического эксперимента.



Зоны действия режимов местоопределения:  
 «А» - режим абсолютного местоопределения;  
 «Б» - режим кодового дифференциального местоопределения;  
 «С» - режим фазового дифференциального местоопределения.

Рисунок 12 - Ошибка оценки координаты X для части кинематического эксперимента.

Результаты длительных натуральных экспериментов (реализация более 70000 секунд) в статичном положении навигационного приемника показали увеличение точности местоопределения при использовании сглаживания по сравнению с первичными оценками координат по МО и СКО ошибки в среднем в 3 раза. Эти результаты хорошо согласуются с результатами имитационного моделирования. Результаты кинематических экспериментов по оценке точности местоопределения подтверждают работоспособность сглаживающего фильтра и его практическую применимость в условиях движения навигационного приемника.

Для тестирования сглаживающего фильтра, определяющего направление движения объекта на малых скоростях и при остановках, была разработана следующая методика: были проведены эксперименты по движению в одном направлении со скоростью 1 км/ч в течение 10 минут с резкими остановками на 5 минут. Затем первичные оценки направления движения обрабатывались модифицированным ФК, и было получено сглаженное значение направления движения. Для задания такого сценария движения был использован имитатор спутниковых навигационных сигналов компании Spirent модели 7700. Помимо задания такого сценария с помощью данного имитатора было получено эталонное значение направления движения. На рисунке 13 представлены значения ошибок определения направления движения для первичных и сглаженных оценок. Статистические характеристики ошибок оценки направления движения представлены в таблице 6.

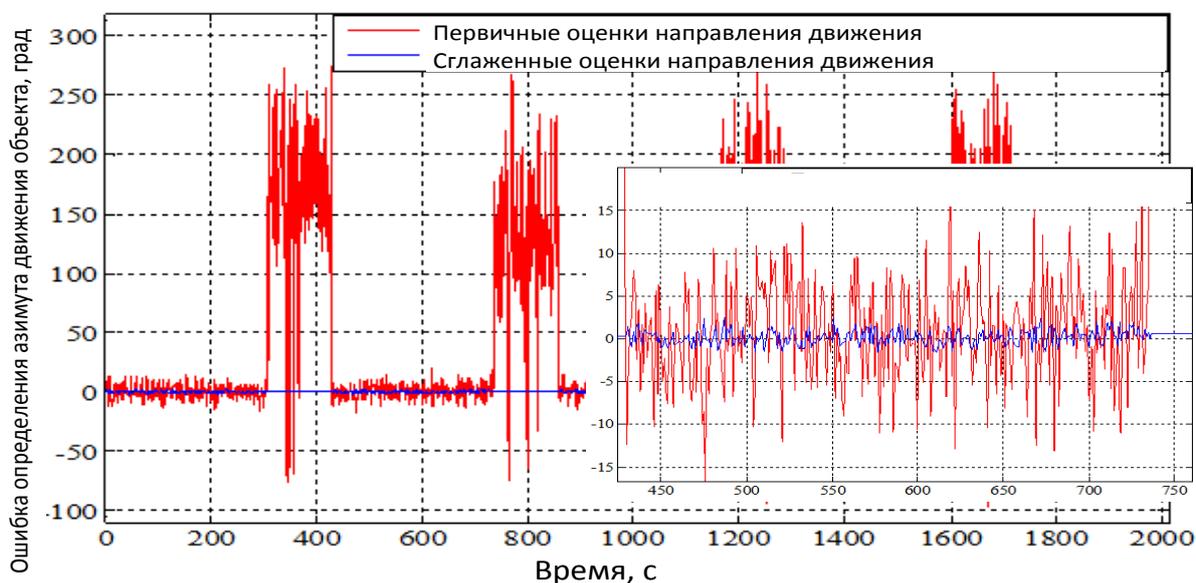


Рисунок 13 - Значения ошибок при определении направления движения объекта.

Таблица 6 Ошибки определения направления движения для первичных и сглаженных оценок.

Режимы	Статистические характеристики	
	МО, град.	СКО, град.
Первичные оценки	0,25	6,91
Сглаженные оценки	0,11	0,62

Из результатов экспериментов, представленных в таблице 6 и на рисунке 14 видно, что при движении со скоростью 1 км/ч СКО ошибки сглаженной оценки направления движения в 10 раз меньше по сравнению с первичной оценкой. Также при остановках предлагаемый метод позволяет зафиксировать значение направления движения. Значение модуля скорости для фиксации угла направления движения в работе было выбрано 0,07 м/с.

### **Основные результаты и выводы**

1. Проведен анализ существующих методов повышения точности местоопределения с использованием сглаживающих фильтров, совместно обрабатывающих кодовые и фазовые измерения, для условий работы в нештатных ситуациях, случайной смене режима работы приемника сигналов ГНСС или при плохих условиях приема спутниковых сигналов.
2. Предложен критерий *гладкости* для оценки качества навигационных определений при решении задач, требующих от приемника сигналов ГНСС, в первую очередь, высокую точность относительного местоопределения и плавное (медленное) изменение ошибки местоопределения. Данный критерий оценивает скорость изменения ошибок оценок координат потребителя и характеризуется величиной дисперсии первой производной по времени от ошибки местоопределения.
3. Для уменьшения ошибок определения координат потребителя без использования дополнительных измерительных модулей в работе записаны уравнения модифицированного фильтра Калмана для совместной фильтрации первичных оценок координат и фазовых приращений координат. Обработка первичных оценок координат в таком фильтре позволит уменьшить шумовую составляющую ошибки местоопределения и ликвидировать разрывы первого рода в навигационном решении при произвольной динамике движения объекта.
4. Для определения направления движения объекта при малых скоростях (1-3 км/ч) с помощью ГНСС приемника в работе предложено использовать модифицированный ФК с учетом особенностей обработки циклической величины, которой является азимутальный угол. Для корректного определения аргумента вектора скорости при остановках объекта, в предлагаемом алгоритме разработан блок, определяющий остановку объекта с использованием значения модуля вектора скорости.
5. Для проверки работоспособности алгоритмов, подбора их параметров, набора статистики было проведено имитационное моделирование работы приемника навигационных спутниковых сигналов в условиях случайного переключения режимов работы. Для этого были разработаны модели ошибок определения координат для разных режимов работы навигационного приемника. На основании анализа поведения медленных ошибок координат, порождаемых задержками в ионосферном слое и наличием переотраженных сигналов, выбраны случайные процессы, описывающие поведение ошибок в имитационной модели.

6. Была разработана методика и проведено экспериментальное тестирование предлагаемых алгоритмов для повышения точности местоопределения и направления движения объекта. Применение сглаживающих фильтров позволило повысить точность оценки координат потребителя в среднем в 3 раза по СКО ошибки. Данные результаты хорошо согласуются с результатами имитационного моделирования.
7. Разработанные алгоритмы реализованы в навигационных приемниках, выпускаемых компанией Топкон Позиционинг Системс, и показали свою работоспособность и эффективность.

#### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Милютин Д.С., Никитин Д.П., Вейцель А.В. Повышение точности местоположения с использованием новых сигналов спутниковых навигационных систем. // Вестник Московского Авиационного института, 2009, т. 16, № 6.
2. Никитин Д.П. Экспериментальное исследование режима локального позиционирования при автономной работе навигационного приемника. Научно-практическая конференция студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике - 2011». 26-30 апреля 2011 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: МЭЙЛЕР, 2011, стр. 61-62.
3. Никитин Д.П. Исследование характеристик режимов работы навигационного приемника с помощью дистанционного доступа. 16-я международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». 3 - 10 июля 2011 года. Крым - Евпатория. Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011, стр. 111-112.
4. Никитин Д.П., Вейцель А.В. Экспериментальное исследование характеристик локального позиционирования в автономном режиме работы навигационного приемника. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011, № 8, стр. 56-63.
5. Никитин Д.П. Исследование методов оценки ориентации вектора скорости при движении навигационного приемника. // Вестник Московского Авиационного института, 2012, т. 19, № 2, стр. 166-172.
6. Никитин Д.П. Совместное использование фазовых и кодовых измерений для дифференциального режима позиционирования. // Телекоммуникации, 2012, № 6, стр. 8-33.
7. Veitsel V.V., Nikitin D.P., Plenkin A.V., Veitsel A.V., Zhodzishsky M.I., Prasolov V.A. Method and Apparatus of GNSS receiver Heading determination. United States Patent Application, № 13383807, 12.1.2012.
8. Zhodzishsky M.I., Veitsel V.A., Veitsel A.V., Nikitin D.P., Veitsel V.V. Improving the Positioning Quality of Global Navigation Satellite System Receivers Operating in the Differential Navigation Mode. United States Patent Application, № 138380245, 17.2.2012.