

На правах рукописи

УДК 629.783:527

Герко Сергей Александрович

Алгоритмы определения относительных координат подвижных объектов по измерениям псевдофаз и их приращениям в ГНСС

Специальность 05.12.14 - Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
С.С. Марков.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
О.В. Денисенко;
кандидат технических наук,
А.В. Бруханский.

Ведущая организация: ОАО Научно-исследовательский институт
космического приборостроения
(ОАО «НИИ КП»).

Защита состоится 25 сентября 2012 года в 10⁰⁰ на заседании Диссертационного Совета Д212.125.03 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба присылать по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат разослан « » 2012 г.

Учёный секретарь Диссертационного Совета Д212.125.03
к.т.н., доцент М.И. Сычёв

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Потенциальные возможности современных ГНСС ГЛОНАСС и GPS открывают широкие возможности их применения в самых разнообразных областях человеческой деятельности. Использование псевдофазовых измерений позволило расширить функциональные возможности навигационной аппаратуры пользователя (НАП) в следующих областях:

1. определение пространственной ориентации объектов, в том числе курсоуказание подвижных объектов воздушной, морской и сухопутной техники как в условиях ограниченной видимости навигационных космических аппаратов (НКА), так и при отсутствии альтернативных высокоточных средств определения ориентации;

2. мониторинг и управление движением объектами, например, горнодобывающей техники, посадкой летательных аппаратов (ЛА) на авианосец и т.д.;

3. определение относительных координат подвижных объектов для обеспечения безопасности совместного движения различных объектов, например, заправка ЛА в воздухе, полёт самолётов в строю, организация поисковых операций, а также стыковка космических кораблей.

Для решения перечисленных задач к НАП предъявляются жёсткие требования на точность полученного им решения. Ошибки, как правило, разделяются на нормальные и аномальные. Нормальные ошибки характеризуются дисперсией, аномальные - вероятностью появления. Наибольшую опасность представляют аномальные ошибки т.к. их величина может достигать весьма больших значений.

Требования к допустимым ошибкам зависят от конкретной задачи. Так, например, в задачах управления движением группы объектов допустимая величина СКО нормальных ошибок имеет порядка нескольких сантиметров, а в задачах связанных с определением пространственной ориентации СКО не должна превышать нескольких миллиметров.

В навигационных системах аномальные ошибки чаще всего возникают при разрешении псевдофазовой неоднозначности. Аномальные ошибки, например, для задач захода на посадку ЛА, имеют величину 10^{-7} . Можно показать, что для решения

других задач, например, при управлении строительной или сельскохозяйственной техникой, а также в геодезии достаточно обеспечить вероятность $10^{-2}..10^{-4}$.

Для получения высокой точности требуется осуществлять комплексирование разрабатываемой системы, например, с инерциальными датчиками.

Средствами ГНСС требования по точности могут быть достигнуты только при использовании псевдофазовых измерений, которые обеспечивают миллиметровые нормальные ошибки. Однако по своей природе псевдофазовые измерения являются неоднозначными, что приводит к необходимости решения дополнительной задачи - разрешения фазовой неоднозначности. Известно, что вероятность правильного разрешения зависит от числа НКА, выбранного алгоритма обработки псевдофазовых измерений, типа и качества используемых измерений, а также от длины базового вектора. Например, чем больше длина базового вектора, тем меньше вероятность правильного разрешения.

Известные методы определения относительных координат имеют ряд недостатков. Так, во-первых, они не обеспечивают большую вероятность правильного разрешения неоднозначности при малом (не менее 3-4) числе видимых НКА и при приёме однодиапазонных измерений. А во-вторых, большинство известных алгоритмов рассчитано на определение относительных координат неподвижного базового и подвижных привязываемых НП. Для нас же больший интерес представляет случай, когда подвижны и базовый и привязываемые НП. Именно он рассмотрен в представленной диссертации.

Для решения поставленных задач в диссертации предлагается использовать дополнительные измерения, в том числе измерения псевдодальностей и приращений псевдофаз на длительных интервалах времени.

В известной литературе измерения приращений псевдофаз рассматривались преимущественно при определении относительных координат статических объектов. Для динамических объектов таких хорошо разработанных решений нет, а теория применения приращений фазы для относительных определений, в общем случае, далека от завершения. Это привело к отсутствию необходимой базы для проектирования рабочих алгоритмов, которые можно использовать в перспективных проектах.

Исследования, проведённые в диссертации, направлены на ликвидацию этого пробела. Таким образом, представленную работу по разработке и исследованию новых алгоритмов определения относительных координат подвижных объектов по измерениям псевдофаз и их приращениям в ГНСС следует признать актуальной.

Цель работы

Разработка алгоритмов, обеспечивающих определение относительных координат группы подвижных объектов с малой вероятностью появления аномальных ошибок и сантиметровой точностью при наличии в зоне видимости не менее чем 3-4 НКА.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи

1. Проведён анализ современных методов определения относительных координат объектов по измерениям параметров сигналов ГНСС и выявлены возможности по точности и вероятности появления аномальных ошибок при оценке относительных координат подвижных объектов.

2. Разработаны алгоритмы определения относительных координат подвижных объектов по измерениям разностей псевдофаз и их приращений во времени.

3. Определены характеристики и проведён сравнительный анализ разработанных алгоритмов определения относительных координат подвижных объектов.

4. Проведена практическая апробация измерений первых разностей псевдофаз и их приращений для определения относительных координат объектов.

Объект исследования

Объектом исследования диссертационной работы является система, состоящая из нескольких навигационных ГЛОНАСС/GPS приёмников, размещённых на подвижных объектах, предназначенная для определения относительных координат этих объектов по измерениям разностей псевдофаз и их приращений.

Предмет исследования

Предметом исследования диссертации являются алгоритмы, обеспечивающие определение относительных координат подвижных объектов с высокой

вероятностью правильного разрешения неоднозначности и достижением сантиметровой точности оценок координат при использовании измерений не менее чем по 3-4 НКА.

Методы исследования

Исследование проводилось путём теоретического анализа по математическим моделям, эвристики, имитационного моделирования и натурального эксперимента. В исследованиях учитывались требования, предъявляемые к современной НАП.

Научная новизна

Исследования, проведённые в диссертации, являются очередным шагом в развитии теории определения оценок относительных координат по псевдофазовым измерениям в ГНСС. В работе:

- приведён анализ возможности использования измерений приращений псевдофаз для определения относительных координат подвижных объектов при увеличении числа оцениваемых параметров без привлечения дополнительной информации, полученной от внешних источников;

- разработаны алгоритмы, позволяющие получать определения относительных координат подвижных объектов с высокой точностью и малой величиной аномальных ошибок, улучшающие характеристики известных ранее алгоритмов;

- показано, что использование измерений приращений первых/вторых разностей псевдофаз, сформированных как на основном, так и на дополнительных интервалах времени, позволяет улучшить вероятность правильного разрешения неоднозначности при малом числе видимых НКА (3-6).

Достоверность

Достоверность результатов обеспечивается практической проверкой предложенных алгоритмов и методик посредством измерений, полученных при помощи современных НП; корректностью и полнотой исходных предпосылок, математической строгостью преобразований и доказанных утверждений.

Практическая ценность

Результаты диссертации могут быть использованы при разработке НАП,

предназначенной для определения относительных координат подвижных объектов и их пространственной ориентации с сантиметровой точностью при приёме сигналов не менее чем от 3-4 НКА с вероятностью появления аномальных ошибок меньше, чем $10^{-2}..10^{-3}$. Разработан полный комплекс методик по проведению калибровок разностей задержек сигналов во всех звеньях радиочастотной части НАП.

Публикации и апробация работы

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ (в том числе 3 статьи в 2-х журналах из перечня изданий ВАК). Основные результаты диссертации апробированы при обработке измерений, полученных навигационными приёмниками, доложены на научно-технических семинарах и конференциях, включая международную, а также представлены в материалах международной школы по спутниковой навигации. Две программы для ЭВМ зарегистрированы в реестре программ для ЭВМ (св. №2011613935/20.05.2011, №2012611208/30.01.2012).

Реализация научно-технических результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении исследований, проводимых по госконтракту №П1046 от 20.08.2009, выполненного в рамках программы ФЦП «Кадры» (научно-технические отчёты [10-11]).

Научные положения и выводы диссертации реализованы в ОАО «Российская корпорация ракетно-космических и информационных систем» при выполнении научно-исследовательской работы [12] (шифр НИР «Комплекс-АКТ-2010») по госконтракту 754-Г028-09 от 23.03.2009. В дальнейшем планируется их использование при разработке программного обеспечения НАП, предназначенного для определения относительных координат подвижных объектов.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование вторых разностей измерений приращений псевдофаз в задачах определения относительных координат подвижных объектов позволяет существенно увеличить вероятность правильного разрешения неоднозначности при малом числе видимых НКА по сравнению с традиционными методами. Так, например, при числе НКА равном 7 и длине базовой линии 1..10 метров вероятность

правильного разрешения составляет 0,99 при приёме сигналов в диапазоне L1 на интервале наблюдения равного нескольким минутам. При использовании традиционного метода RTK вероятность правильного разрешения составляет величину $\leq 0,66$.

2. Использование вторых разностей приращений псевдофаз, сформированных как на полном интервале времени наблюдения, так и на отдельных подинтервалах, позволяет при малом числе (4..6) видимых НКА увеличить вероятность правильного разрешения неоднозначности. Подинтервалы являются частью общего интервала и оканчиваются в один и тот же общий момент времени (текущий).

3. С увеличением числа видимых НКА и среднего времени получения первого определения увеличивается вероятность правильного разрешения неоднозначности. Например, при использовании вторых разностей однодиапазонных измерений приращений псевдофаз, сформированных по пяти НКА на интервале времени 1 минуты, обеспечивается вероятность правильного разрешения неоднозначности 0,67, а на интервале 30 минут - 0,9.

4. Использование предложенных в диссертации методик калибровок задержек в РЧ части НАП позволяет при наличии в зоне видимости не менее 3-4 НКА реализовать алгоритм определения относительных координат подвижных объектов, основанный на измерениях первых разностей псевдофаз и их приращений.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, библиографического списка из 40 наименований, 3-х приложений, содержит 159 страниц текста, 3 таблицы и 35 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проводится обоснование актуальности диссертационной работы. Описывается понятие базового вектора, а также виды обработки измерений. Рассмотрены подходы к решению главной проблемы определения относительных координат - задаче разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений.

Определение относительных координат подвижных объектов заключается в определении относительных координат между фазовыми центрами антенн НП,

закреплённых на этих объектах. Один из НП принято называть базовым, остальные привязываемыми («роверами»). Вектора, соединяющие фазовые центры антенн НП называют базовыми. Измерения базового и привязываемых НП собираются в единый вычислитель, где подвергаются совместной обработке (рис. 1). На рис. 1

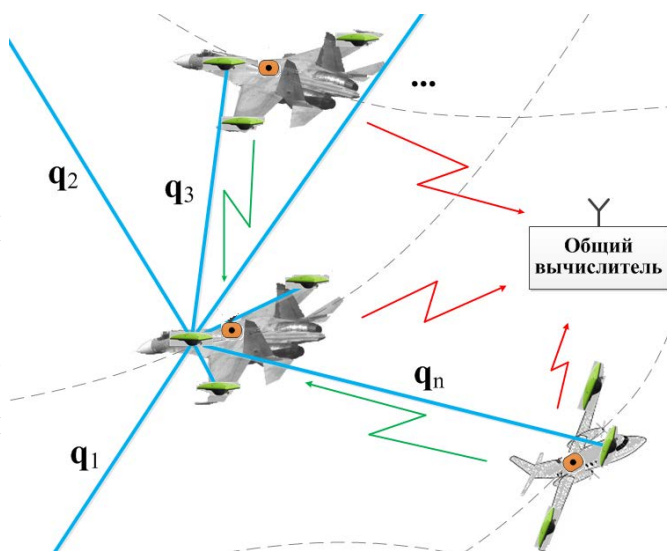


Рис. 1. Варианты обработки измерений

q_p ($p = \overline{1, n}$) - базовые вектора. Возможны два варианта обработки измерений. В первом - «сырые» (необработанные) измерения привязываемых НП оперативно передаются по специальной линии связи в базовый НП, где в дальнейшем обрабатываются совместно с собственными измерениями. Во втором варианте «сырые» измерения передаются в общий вычислитель, пространственно удалённый от НП.

В зависимости от длины базового вектора на точность определения относительных координат и вероятность правильного разрешения неоднозначности прежде всего влияют ошибки распространения радиосигналов в атмосфере, ошибки многолучёвости и частотно-временного обеспечения, а также число видимых НКА.

В первой главе проводится обзор существующих алгоритмов, выявляются проблемы, возникающие при определении относительных координат подвижных объектов, формулируется постановка задачи диссертационного исследования.

Одним из самых известных методов определения относительных координат подвижных объектов является метод RTK (Real Time Kinematic). Традиционный метод RTK (рис. 2) позволяет получать сантиметровую точность оценок координат при движении привязываемого НП относительно неподвижного базового.

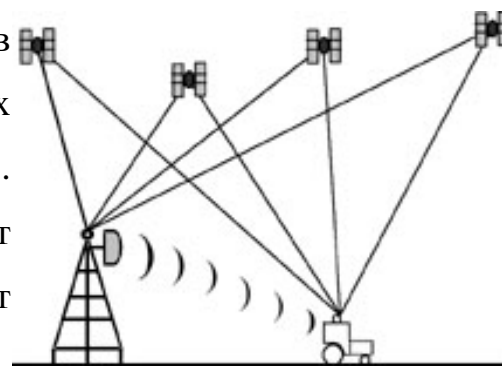


Рис. 2 Традиционный метод RTK

Данный метод является одномоментным. Достаточно высокая вероятность правильного разрешения неоднозначности в этих условиях достигается при

использовании двухдиапазонных измерений по не менее чем 6 НКА (не менее чем 11 НКА по однодиапазонным измерениям). Недостатком данного метода является то, что на практике возникают ситуации, когда необходимо решить задачу при меньшем числе видимых НКА, а также в условиях подвижности как привязываемых, так базового НП.

Метод Moving Base RTK, разработанный Trimble Navigation, отличается от традиционного метода RTK. Этот метод позволяет вычислять вектор (A), представленный на рис. 3, с сантиметровой точностью, а также угол между вектором (B) и направлением на дополнительную станцию (SPM). При этом объект и станция (SPM) могут быть подвижными. Данный метод позволяет выполнить требования техники безопасности при заходе судов в док или при швартовке борт к борту. Он предполагает использование измерений приращений разностей псевдофаз, сформированных на интервале времени между текущим и предыдущим измерением, т.е. накопление производится за эпоху. Непосредственный отказ от использования измерений первых/вторых разностей псевдофаз исключает

необходимость разрешения неоднозначности, однако приводит к ухудшению точности. В литературе не раскрывается, каким образом в этом алгоритме компенсируется разность ухода часов обоих НП, а также, какое число НКА необходимо для обработки.

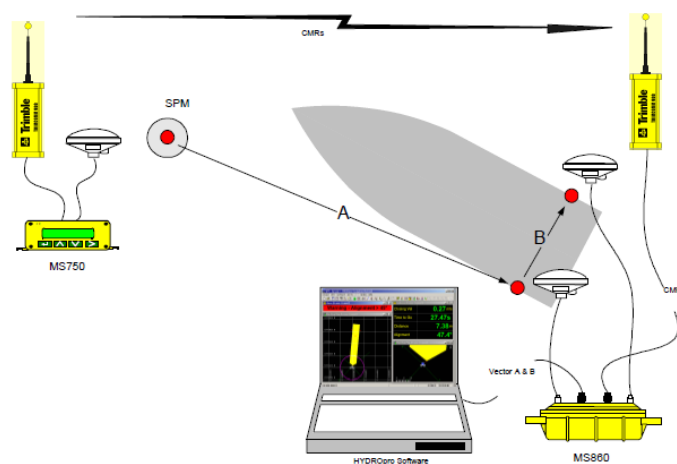


Рис. 3. Методика Moving Base RTK

Аналогичный метод решения задач главной целью которых является измерение относительных приращений локальных координат отдельного НП по отношению к его начальным координатам, рассмотрен в патенте М.И. Жодзишского, В.А. Вейцеля и др. Метод использует приращения первых разностей псевдофаз на коротком интервале времени - «эпоху». Предложенный подход к решению задач интересен, однако, условия его использования, приведённые в патенте, не совпадают с условиями, рассматриваемыми в диссертации. Этот метод позволяет оценить лишь приращения локальных координат каждого из подвижных объектов во времени без привязки НП

между собой.

В диссертации также рассмотрен опыт решения задач, близких к поставленной, содержащийся в ряде работ по определению пространственной ориентации объектов. Обзор существующих методов показал, что в настоящее время известные алгоритмы определения относительных координат объектов в полной мере не обеспечивают выполнение требований на вновь проектируемые НАП.

В диссертации предложены алгоритмы определения относительных координат, основанные на использовании измерений первых/вторых разностей псевдофаз и их приращений во времени. При этом расширяется вектор оцениваемых параметров.

Предлагаемые измерения приращений псевдофаз являются более точными однозначными измерениями, чем измерения псевдодальностей (которые лежат в основе метода RTK). Однако, эффективное использование приращений псевдофаз возможно лишь при хорошем геометрическом факторе, который достигим только на длительных интервалах времени не менее нескольких минут.

Во второй главе рассмотрены математические модели и особенности использования измерений первых и вторых разностей псевдофаз при оценке относительных координат подвижных объектов. Описан процесс составления и алгоритм решения системы уравнений, основанных на указанных измерениях.

Математические модели первых разностей псевдофаз и их приращений

$$\Delta\varphi^n(t_i^a, t_i^b) = \frac{\Delta R^n(t_i^a, t_i^b)}{\lambda^n} + f^n(dT_a(t_i^a) - dT_b(t_i^b)) - f^n(dT^n(t_{i, \text{prec}}^a) - dT^n(t_{i, \text{prec}}^b)) + \Delta\psi_0 + \Delta\psi_{\text{atm}}^n - \Delta\psi_{\text{h}}^n - \Delta\psi_{\text{mp}}^n - \Delta v^n + \Delta M^n + \Delta\xi_{\delta\varphi}^n, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta\delta\varphi^n(t_s^a, t_e^a, t_s^b, t_e^b) &= \delta\varphi_a^n(t_s^a, t_s^a) - \delta\varphi_b^n(t_e^b, t_e^b) = \\ &= \frac{\Delta R^n(t_e^a, t_e^b) - \Delta R^n(t_s^a, t_s^b)}{\lambda^n} + f^n(dT_a(t_e^a) - dT_b(t_e^b)) - f^n(dT_a(t_s^a) - dT_b(t_s^b)) - \\ &- f^n(dT^k(t_{e, \text{prec}}^a) - dT^n(t_{e, \text{prec}}^a)) + f^n(dT^n(t_{s, \text{prec}}^a) - dT^n(t_{s, \text{prec}}^b)) - \Delta\delta v^n + \Delta\xi_{\delta\delta\varphi}^n \end{aligned} \quad (2)$$

где t_i^a и t_i^b - i -ый момент измерения в b -базовом и a -привязываемом НП, s и e - обозначают моменты начала и конца формирования приращений псевдофаз, $\Delta R^n(t_i^a, t_i^b)$ - первая разность расстояний от НКА до НП, λ^n и f^n - длина волны и

частота несущей принимаемого сигнала от n -го НКА, $dT(t_i)$ - смещение показаний часов НП относительно показаний часов системы, $dT^n(t_{i,prec}^n)$ - поправка к показаниям часов НКА на момент предшествования $t_{i,prec}^n$, $\Delta\psi_0$ - разность начальных фаз НП, $\Delta\psi_0^n$ - разность начальных фаз излучения n -го НКА, $\Delta\psi_{atm}^n(t_i)$ - разность ошибок, вносимых атмосферой, $\Delta\psi_h^n(t_i)$ - разность аппаратурных задержек между РЧ трактами, $\Delta\psi_{mp}^n(t_i)$ - разность многолучевых искажений, $\Delta v^n(t_i)$ - разность ошибок слежения, $\Delta M^n(t_i)$ - разность неопределённых целых, $\Delta\xi_{\varphi}^n$ - шумы измерений, δ обозначает формирование приращения величины во времени.

Из (1)-(2) видно, что среднеквадратические ошибки измерений приращений псевдофаз лишь в $\sqrt{2}$ раз превышают среднеквадратические ошибки измерений самих псевдофаз, т.е. измерения приращений псевдофаз, так же как и измерения псевдофаз, являются достаточно точными.

При разработке алгоритмов определения относительных координат подвижных объектов считалось, что вопросы компенсации влияния ионосферы, многолучёвости, эфемерид, ошибок слежения не входят в рамки данной диссертационной работы. Предполагается, что влияние этих факторов сведено к минимуму путём использования широко известных способов. Основное внимание было направлено на уменьшение шумовой ошибки.

Как видно из (1), помимо дальностей до НКА первые разности псевдофаз зависят от неинформативных параметров: разности начальных фаз базового и привязываемого НП, разности смещений часов этих НП, а также разности задержек в РЧ тракте НП. Для исключения неинформационных параметров формируются вторые разности псевдофаз и их приращений.

Использование приращений предполагает отсутствие в них разрывов слежения (cycle slips) за фазой несущей. Алгоритмы обнаружения и устранения срывов слежения за фазами освещаются в ряде работ. В основном, они основаны на анализе различных линейных комбинаций измерений.

Использование измерений вторых разностей псевдофаз и их приращений позволяет составить систему нелинейных уравнений. Линеаризация этих уравнений

приводит к следующей системе линейных матричных уравнений

$$\begin{bmatrix} \Upsilon \\ \Phi_e + \mathbf{k} \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{d}\theta + \Xi, \quad (3)$$

где Φ_e и Υ - составные вектора невязок первых/вторых разностей псевдофаз на текущий момент времени и их приращений, сформированных на интервале между моментами s и e , \mathbf{H} - составная градиентная матрица, $\mathbf{d}\theta = [\mathbf{d}\theta_s^T \quad \mathbf{d}\theta_e^T]^T$ - составной 6-мерный вектор, состоящий из векторов поправок к первым разностям грубых координат НП на моменты s и e , \mathbf{k} - неопределённый составной целочисленный вектор, Ξ - составной вектор шумов измерений. Составные вектора и матрицы образуются путём совмещённого использования измерений по грубым и точным кодам сигналов в диапазонах L1 и L2 для обеих ГНСС.

На рис. 4 представлена упрощённая блок-схема алгоритма. После составления системы линейных матричных уравнений производится процедура разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений. Далее вычисляется максимально правдоподобная оценка 6-мерного вектора $\mathbf{d}\theta$. В соответствии с теорией



Рис. 4 Блок-схема алгоритма

линейного оценивания, для оценки вектора $\mathbf{d}\theta$ необходимо решить систему, в формировании которой участвуют измерения не менее чем по 6-7 НКА. Для преодоления этого ограничения в диссертации разработан алгоритм, представленный далее.

В отличие от предложенного ранее алгоритма, в качестве однозначных измерений предлагается помимо измерений вторых разностей приращений псевдофаз, сформированных как на полном (основном интервале) использовать аналогичные приращения на дополнительных подинтервалах времени. Временная

диаграмма

представлена на рис. 5.

На рис. 5 по оси

отложено

Подинтервалы



являются частью общего интервала и оканчиваются в один и тот же общий момент времени t_e (текущий). Моменты t_{s_i} , $i = \overline{1, M}$, - моменты начала накопления приращений псевдофаз, M - количество дополнительных моментов времени, на которые формируются измерения. Вместе с ростом числа однозначных измерений в \mathbf{Y} , расширяется и вектор оцениваемых параметров $\mathbf{d}\theta$:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\tau_1}^T & \mathbf{Y}_{\tau_2}^T & \dots & \mathbf{Y}_{\tau_M}^T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d}\theta = \begin{bmatrix} \mathbf{d}\theta_{s_1}^T & \mathbf{d}\theta_{s_2}^T & \dots & \mathbf{d}\theta_{s_M}^T & \mathbf{d}\theta_e^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

Преимущество алгоритма заключается в следующем. С введением измерений приращений псевдофаз на дополнительные моменты времени число однозначных измерений растёт быстрее, чем растёт размер вектора оцениваемых параметров. При этом число неоднозначных измерений, полученных измерениями разностей псевдофаз, остаётся прежним. Однозначные измерения каждого из интервалов коррелированы, и их влияние друг на друга учтено в формировании ковариационной матрицы ошибок вектора $\begin{bmatrix} \mathbf{Y}^T & \Phi_e^T \end{bmatrix}$. Нетрудно показать, что предложенный подход позволяет сократить число НКА до 4-5.

В диссертации представлены средства вычислительной оптимизации разработанных алгоритмов. В ряде приложений нет необходимости производить разрешение неоднозначности на каждую эпоху. Разрешение неоднозначности достаточно провести однократно, и далее производить слежение за срывами слежения за фазой и в случае их наличия производить коррекцию. После того, как неоднозначность разрешена, на последующие моменты времени оценку координат можно производить только по однозначным измерениям вторых разностей псевдофаз, содержащих всего 3 оцениваемых параметра. Это означает, что число НКА, минимально необходимое для обработки, равно 4. Однако, уменьшение числа видимых НКА приведёт к ухудшению точности оценок координат.

В третьей главе проведены исследования характеристик разработанных алгоритмов определения относительных координат подвижных объектов, представленных во второй главе. Испытания проводились как по измерениям, полученным НП, так и путём имитационного моделирования. Приведено описание имитационной модели. Исследовано влияние динамики объектов на характеристики

разработанных алгоритмов. В зависимости от предъявляемых требований представлены рекомендации по выбору параметров разработанных алгоритмов.

Проведено экспериментальное исследование алгоритма, основанного на измерениях разностей псевдофаз на текущий момент времени и их приращений по измерениям, полученным НП. Пришвартованный корабль стоял в порту. Под влиянием ветра и волн он совершал колебательные движения. Длина базового вектора составляла примерно 8 м. На рис. 6 представлена зависимость ошибки оценивания длины базового вектора от времени обработки. Эксперимент показал,

что СКО ошибки оценивания длины базового вектора составляет 7,5 мм.

Разрешение неоднозначности производилось LAMBDA-методом. Время до получения первого надёжного решения составило 6 минут.

Разработанные алгоритмы тестировались посредством имитационного моделирования

измерений, полученных на движущихся объектах. Исследовалось как равномерное, так и равноускоренное движение. Также проводилось моделирование на совокупности подвижных объектов - группы самолётов Су-22, осуществляющих параллельный полёт по замкнутому маршруту, состоящему из прямолинейных участков и поворотов. Средняя моделируемая скорость - 220 м/с. Формировались двухдиапазонные (L1+L2) измерения, с СКО псевдофазы $2,5 \cdot 10^{-3}$ цикла и СКО псевдодальности 2 м. Моделирование ошибок многолучёвости не производилось. Длительность интервала моделирования (сеанса) 1 ч. Длина базовых векторов 80 м. При моделировании объектам задавались различные параметры движения. На рис. 7 представлен типичный график ошибок оценок проекций базового вектора при равномерном движении по двухдиапазонным измерениям вторых разностей по сигналам от 7 НКА.

В эксперименте получено СКО ошибок оценок координат менее 10^{-3} м, а вероятность правильного разрешения неоднозначности равна 1. Результаты,

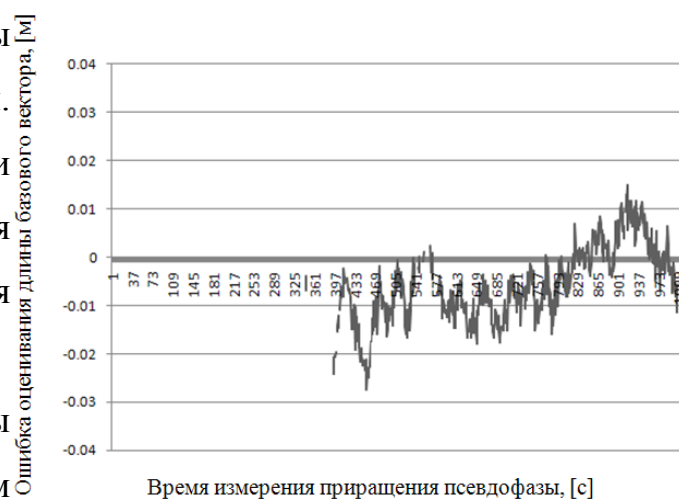


Рис. 6. Ошибка оценивания длины базового вектора по 7 НКА GPS и 2 НКА ГЛОНАСС

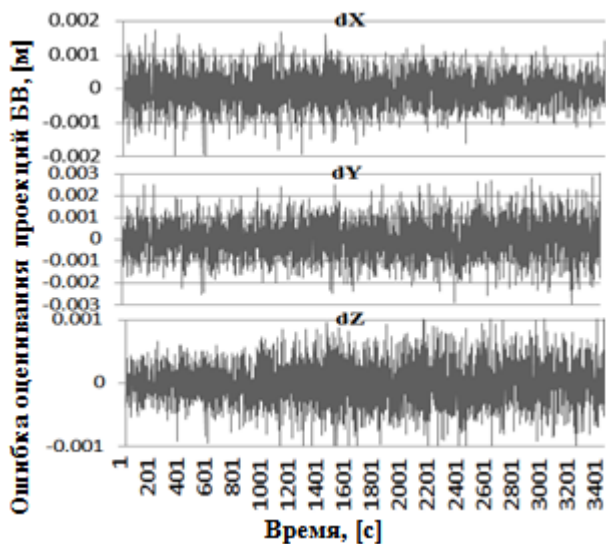


Рис. 7. Оценка проекций базового вектора в динамике

полученные в эксперименте с равноускоренным движением сопоставимы с результатами, полученными при равномерном движении.

На рис. 8 представлены зависимости вероятности правильного разрешения неоднозначности для различных алгоритмов при работе по реальным измерениям.

При проведении эксперимента использовались L1 измерения, полученные

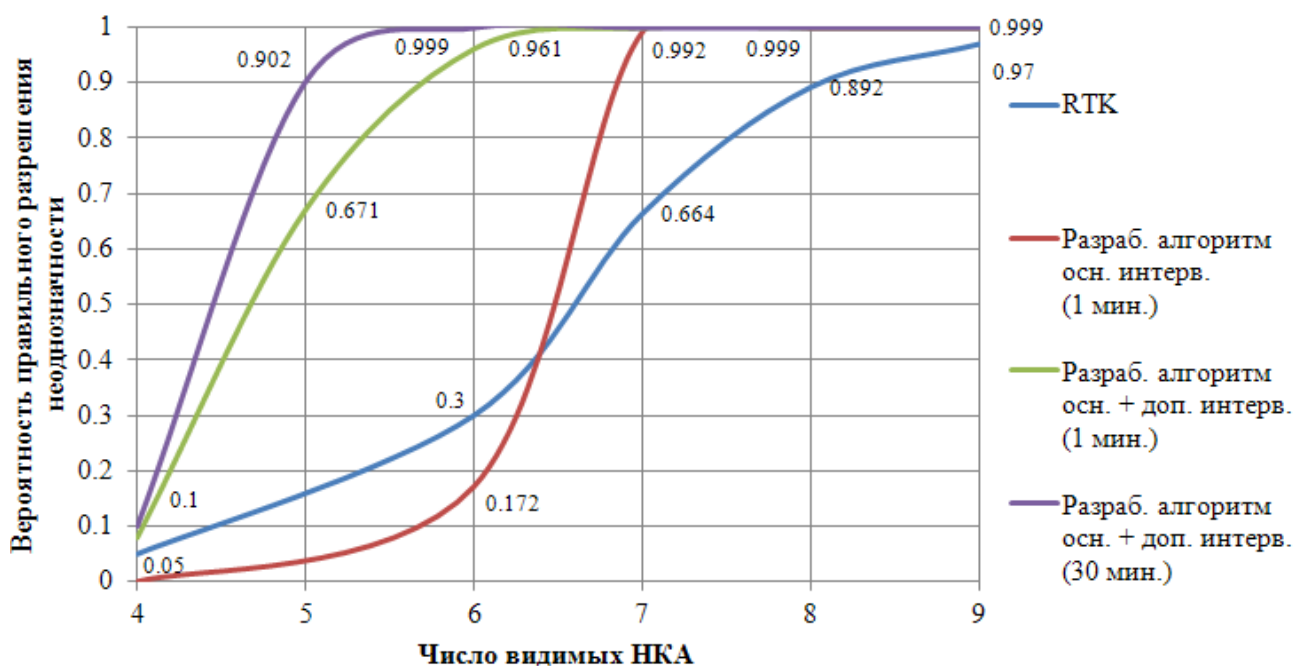


Рис. 8. Сравнение вероятности правильного разрешения неоднозначности алгоритмов по 4-9 НКА GPS на малоподвижных близко расположенных (около 1 м.) объектах.

Длительность проведения эксперимента составила 1 час. Из рисунка видно, что традиционный метод RTK позволяет получать высокую вероятность правильно разрешения лишь при числе НКА не менее 9. Разработанный алгоритм, основанный на использовании основных интервалов накопления приращений, позволяет получать высокую вероятность лучше 0,99 по не менее чем 7 НКА. Избыточное число измерений увеличивает вероятность правильного разрешения неоднозначности. На рисунке указана длительность интервала накопления приращений, свыше которой гарантированно обеспечивается указанная вероятность правильного разрешения неоднозначности (что определяет время до получения

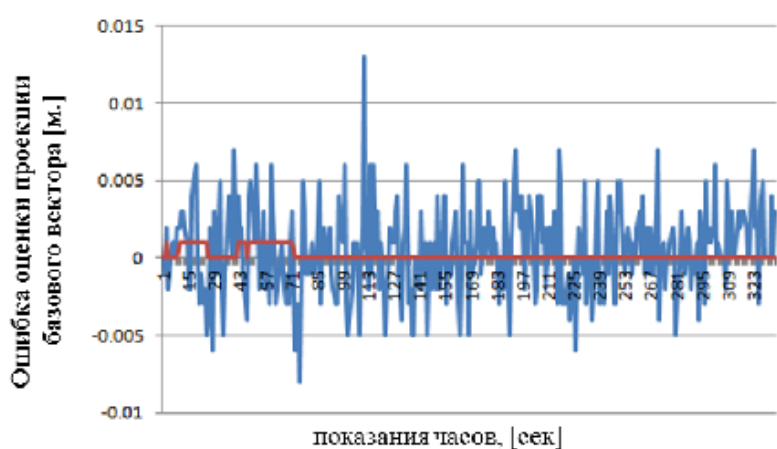
первого надёжного решения). Однако данный алгоритм не обеспечивает высокого разрешения при работе с малым (4-6) числом НКА.

Преодолению этого недостатка послужил алгоритм, который использует помимо основных приращений дополнительные моменты времени. На рис. 8 представлены две зависимости вероятности правильного разрешения неоднозначности в зависимости от числа НКА. Длительность интервала накопления приращений для составила 1 минуту и 30 минут. В этих случаях большая вероятность достигается уже при 5-6 НКА. При этом контрастное отношение существенно возрастает. Чем больше время накопления, тем выше вероятность правильного разрешения. Число используемых в процедуре разрешения интервалов накопления составило $M = 2..4$ при выборе наилучшего контрастного отношения. Все результаты в экспериментах получены без использования фильтрации по времени. Для возможности работы алгоритма по 4 НКА необходимо дополнительно использовать измерения во втором диапазоне L2.

При проведении исследования получено, что наилучшее разрешение неоднозначности достигается при разнесении моментов времени t_{s_i} $i = \overline{1, M}$ и t_e друг от друга приблизительно на одинаковую величину.

Проведён эксперимент по реальным измерениям с привлечением средств оптимизации, предложенных в диссертации. В качестве группы подвижных объектов использовались две антенны, закреплённые на подвижном основании.

Результаты обработки алгоритмом представлены на рис. 9, где показан график



ошибки оценки проекции X базового вектора по вторым разностям псевдофаз и их приращений при приёме двухдиапазонных сигналов от 4 НКА GPS. На оси абсцисс текущее время ограничено интервалом,

когда неоднозначность уже разрешена однократно. На каждую эпоху производится контроль за срывами слежения за фазой несущей и осуществляется оценка относительных координат.

Исследования показали, что усреднённая СКО ошибки оценки относительной координаты, полученная алгоритмом при использовании 4 НКА по известной длине базового вектора, в полтора раза больше СКО ошибок, полученных при использовании 5 НКА (при одинаковых условиях моделирования). Однако в ряде приложений ухудшением точности полученных оценок можно пренебречь.

Предложенный алгоритм может в перспективе использовать новый сигнал L3 в системе ГЛОНАСС, что позволит улучшить точность оценок относительных координат, а также позволит добиться лучших характеристик в процедурах, связанных с разрешением неоднозначности.

Четвёртая глава посвящена исследованию возможности использования измерения первых разностей псевдофаз и их приращений при определении относительных координат объектов.

Известно, что препятствием к использованию первых разностей псевдофаз для определения относительных координат объектов является то, что они содержат фазовые искажения между РЧ звеньями НАП, различные начальные фазы, а также различные смещения часов НП. Учёт этих параметров возможен в случае использования специальной системы НАП. Так, при решении задачи определения пространственной ориентации объектов, в ряде работ предложено использовать систему НАП, структурная схема которой представлена на рис. 10. НАП включает антенны, коммутационную часть, и измеритель - многоантенный НП, структурная схема которого изображена на рис. 11.



Рис. 10. Структурная схема НАП

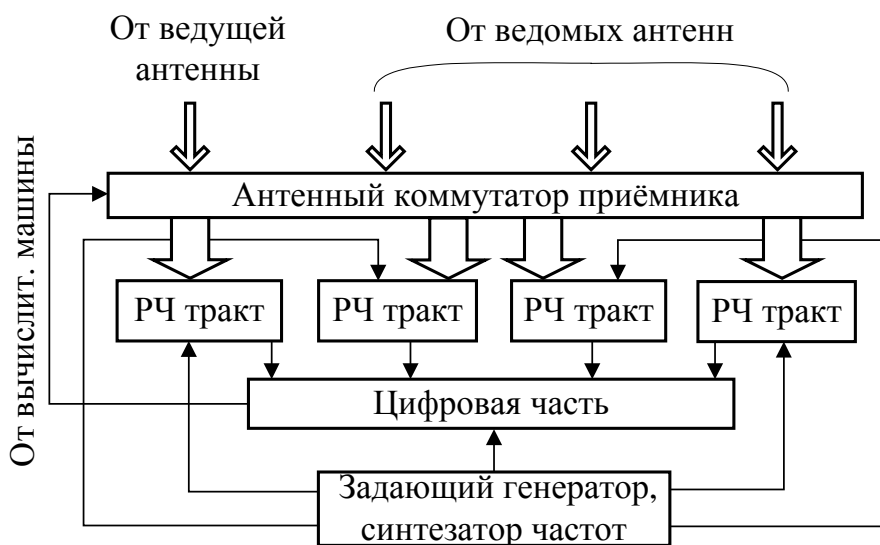


Рис. 11. Структурная схема многоантенного НП

Общая шкала времени многоантенного НП позволяет исключить смещение

шкал времени базового и привязываемого НП, входящее в (1), а общий задающий генератор позволяет исключить неопределённую начальную фазу генератора в первых разностях измерений. Таким образом, математическая модель измеряемой псевдофазы для n-го НКА, формируемая в предложенном НАП, примет вид

$$\Delta\varphi_{\text{изм.}}^n(t_i) = \frac{\Delta R^n(t_i)}{\lambda^n} - \Delta\psi_h^n + \Delta M^n - \Delta\xi_{\varphi}^n \quad (5)$$

Однако при данном построении НАП первые разности псевдофаз содержат разности задержек в РЧ звеньях многоантенного НП. Первые разности задержек сигналов можно представить в виде целой (int) и дробной (frac) части.

$$\Delta\psi_h^n = \text{int}(\Delta\psi_A^n + \Delta\psi_{\text{КЧ}}^n + \Delta\psi_{\text{РЧ}}^n) + \text{frac}(\Delta\psi_A^n + \Delta\psi_{\text{КЧ}}^n + \Delta\psi_{\text{РЧ}}^n) \quad (6)$$

Согласно (6) только дробная часть первых разностей этих задержек сигналов является информативным параметром, а целую часть допустимо приобщить к ΔM^n .

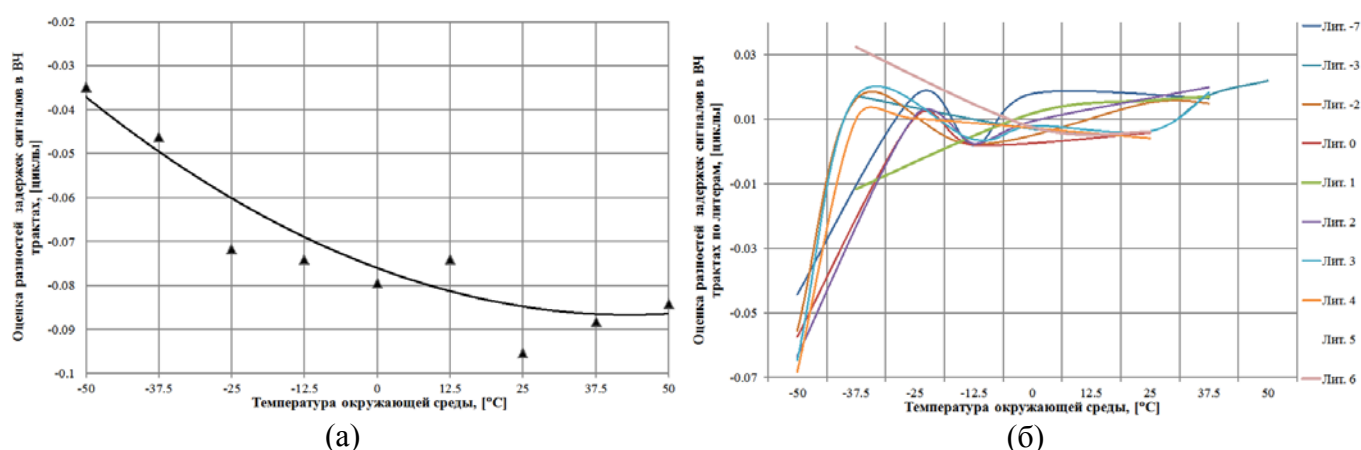
НП рассмотренной структуры способен проводить периодические калибровки дробных составляющих величины $\Delta\psi_h^n$. Для использования измерений первых разностей псевдофаз при решении задач определения относительных координат объектов разработан ряд методик, позволяющих проводить калибровку дробных частей задержек сигналов в различных РЧ частях НАП: первых разностей в антеннах ($\Delta\psi_A^n$) и КЧ НАП ($\Delta\psi_{\text{КЧ}}^n$), а также задержек сигналов в каждом КЧ НАП ($\psi_{\text{КЧ}}^n$), первых разностей в РЧ трактах многоантенного НП ($\Delta\psi_{\text{РЧ}}^n$). По полученным величинам проводится корректировка первых разностей псевдофазовых измерений.

В диссертации показано, что разности задержек в РЧ трактах сигналов ГНСС являются медленно меняющимися функциями времени, поэтому на ближайшем после проведения очередной калибровки интервале времени их можно считать постоянными. В диссертации выдвинуты рекомендации по проведению калибровки.

Калибровки, как правило, проводятся перед установкой аппаратуры на объекты. Однако в процессе эксплуатации ряд операций может производиться в областях, где температура окружающей среды отличается от номинальной. Например, при перемещении ЛА в холодные слои атмосферы, облака вулканической активности и т.д. В таких случаях проведение калибровок, в процессе которых производится перекоммутация кабелей, в новом температурном

диапазоне не предоставляется возможным. В связи с этим, разработку методик оценок систематических погрешностей, содержащихся во всех составляющих частях РЧ трактов НП, необходимо разрабатывать с учётом изменяемой температуры окружающей среды. После изготовления аппаратуры необходимо провести первичную калибровку с использованием термокамеры. Итогом калибровки являются калибровочные таблицы. Использование значений разностей задержек, полученных для одного диапазона температур и калибровочных таблиц, позволяет рассчитать величины задержек для другого диапазона температур.

Проведены экспериментальные исследования с использованием измерений, полученных НП. В термокамеру помещалась аппаратура в составе многоантенного НП и антенных кабелей. Проводились исследования зависимости разностей задержек в РЧ частях НП от температуры в диапазоне от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$. При проведении испытаний НАП принимал сигналы L1/CA и L2/CA от НКА GPS и ГЛОНАСС. На рис. 12 представлены фазо-температурные характеристики по оценкам разностей задержек в РЧ трактах НП по НКА GPS (рис. 12а) и литерам ГЛОНАСС (рис. 12б) для различной температуры окружающей среды. Разности задержек в РЧ трактах приведены в циклах.



**Рис. 12. Оценка разностей задержек сигналов в РЧ трактах МНП
(а) - GPS, (б) - по литерам ГЛОНАСС**

Как видно из графиков наблюдается существенная зависимость разностей фазовых задержек сигналов в РЧ трактах многоантенного НП при низких температурах окружающей среды. Предположительно это связано с конструктивными особенностями измерительных трактов НАП. Видно, что фазовые задержки в РЧ тракте мало зависят от номера литеры ГЛОНАСС при одной и той же температуре, что позволяет в ряде задач этим различием пренебречь.

На рис. 13 представлена зависимость от температуры разности задержек сигналов в антенных кабелях по множеству сигналов на частотах L1 и L2 GPS. Видно, что антенные кабели более температурно зависимы, чем задержки в РЧ трактах многоантенного НП.

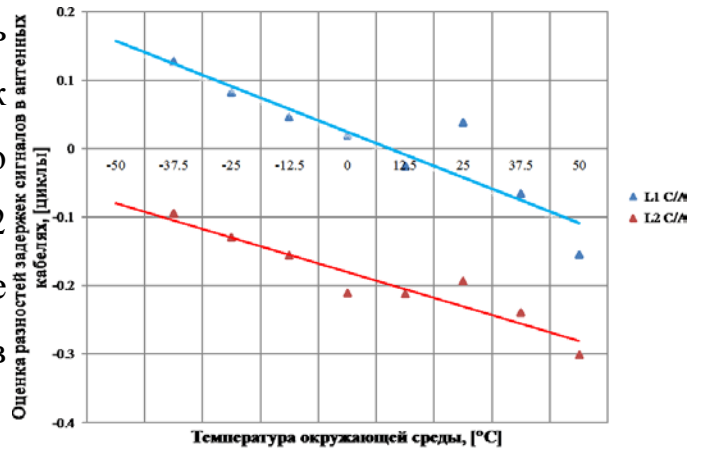


Рис. 13. Влияние температуры окружающей среды на разность задержек сигналов в антенных кабелях сигналов НКА GPS

Проведено сравнение алгоритмов использующих двухчастотных первые и вторые разности псевдофаз по вероятности правильного разрешения неоднозначности. Из рис. 14 видно, что в случае работы с 4 НКА по первым



Рис. 14. Сравнение разрешения неоднозначности при использовании первых и вторых разностей псевдофаз

использование первых разностей измерений выигрывает по сравнению со вторыми.

разностям достигается вероятность правильного разрешения 0,97, а по вторым - 0,39 при прочих равных условиях. Длительность проводимых сеансов составила примерно 40 мин. при использовании НКА ГЛОНАСС, и 2 ч. - НКА GPS. Результат свидетельствует о том, что только при малом числе НКА

В заключении сформированы основные результаты и выводы работы:

- В работе предложены новые алгоритмы построения алгоритмов определения относительных координат движущихся объектов, основанные на использовании псевдофазовых измерений и их приращений. Основным практическим преимуществом этих алгоритмов по сравнению с известными является то, что они позволяют получать оценку относительных координат в условиях видимости малого числа видимых НКА при размещении аппаратуры на подвижном базовом и подвижных привязываемых НП.

- Результаты исследования по реальным измерениям показали, что оценка точности определения относительных координат подвижного объекта с использованием предлагаемых алгоритмов не хуже ~1-2 см. Эксперименты

показали, что при приёме сигналов от 6-7 НКА и длине базовой линии 1..10 метров вероятность правильного разрешения неоднозначности 0,99 обеспечивается после накопления приращений псевдофаз в течение нескольких минут и зависит, прежде всего, от количества видимых НКА и количества принимаемых от них сигналов. При работе с меньшим числом НКА требуется большее время накопления.

- В эксперименте при помощи имитационного моделирования разработанные алгоритмы подтвердили возможность их применения для объектов различных видов динамики.

- Сравнительный анализ алгоритма, основанного на использовании приращений псевдофаз и алгоритма, использующего помимо также приращения на промежуточные моменты времени показал, что последний позволяет получать наиболее высокие характеристики разрешения неоднозначности при малом числе (4-6) видимых НКА. По точности эти алгоритмы имеют одинаковый порядок.

- Сравнительные количественные показатели качества работы новых алгоритмов таковы: одним из главных показателей качества работы разработанных алгоритмов является вероятность правильного разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений. Показано, что в случае работы с 4 НКА по первым разностям достигается вероятность правильного разрешения в 2 раза выше, чем по вторым при прочих равных условиях. При большем числе видимых НКА алгоритм, основанный на работе по первым разностям, существенного выигрыша не даёт.

- Разработаны методики, позволяющие проводить оценку разностей задержек между РЧ частями приёмной аппаратуры. Данные калибровки позволяют использовать измерения первых разностей псевдофаз при работе разработанных алгоритмов. Результаты экспериментов по оценке задержек в РЧ трактах в НП показали, что сами задержки являются медленно меняющимися функциями времени и их оценку достаточно проводить с частотой порядка 1 раз в час. Калибровку задержек в кабелях и антеннах достаточно провести однократно перед подключением к НП.

Подводя итоги проделанной работы, можно сделать следующий вывод. В работе решена научная задача, заключающаяся в разработке новых алгоритмов обработки фазовых измерений, позволяющих определять относительные координаты подвижных объектов по не менее чем 3-4 видимым НКА ГНСС ГЛОНАСС и GPS.

Публикации по теме диссертации

1. Герко С.А., Сорокина И.А. Методы повышения надёжности алгоритмов разрешения неоднозначности ГНСС ГЛОНАСС при ограниченном числе спутников. // Сб. тезисов докладов научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Молодёжь в ракетно-космической отрасли» 21-24 сентября 2009 года, г. Королёв, 2009, с. 72-74.

2. Герко С.А. Метод определения взаимных координат группы манёвренных объектов при использовании ГНСС с варьируемым числом доступных НКА. // Сб. тезисов докладов 15-й международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация», Крым, Евпатория, 27 июня - 4 июля 2010 года, М.: МАИ-ПРИНТ, 2010, с. 106.

3. Герко С.А., Сорокина И.А. Применение приращений псевдофаз при относительных определениях движущихся объектов по сигналам ГЛОНАСС и GPS, М.: Вестник МАИ, Т.16, №7, 2009, с. 49-56.

4. Герко С.А., Сорокина И.А. Методы повышения надёжности алгоритмов разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений с использованием глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС при ограниченном числе спутников. «Космонавтика и ракетостроение», №58(1), 2010, с. 165-172.

5. Герко С.А. Алгоритм определения относительных координат подвижных объектов, основанный на использовании измерений псевдофаз и их приращений в ГЛОНАСС и GPS, М.: Вестник МАИ, Т.18, №4, 2011, с. 87-92.

6. Герко С.А., Марков С.С., Сорокина И.А. Применение приращений разностей псевдофаз для навигационных определений подвижных объектов в условиях ограниченной видимости НКА. // Тезисы докладов III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, ОАО «Российские космические системы», 1-3 июня 2010 года) - М.: Радиотехника, 2010, №51.

7. Герко С.А., Озерова С.Г. Методика оценок разностей фазовых задержек в высокочастотном и антенно-фидерном тракте навигационного приёмника при использовании ГНСС GPS и ГЛОНАСС. // Сб. тезисов докладов научно-

практической конференции молодых учёных и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2010» 26-30 апреля 2010 года, М.: МЭЙЛЕР, 2010, с. 84.

8. Герко С.А., Сорокина И.А. Динамическая калибровка системы определения ориентации объекта по псевдофазовым измерениям в СРНС // тезисы II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», 2-4 июня 2009 года, Москва, ФГУП РНИИ КП, CD носитель.

9. Герко С.А. Разработка алгоритмов определения относительных координат подвижных объектов, основанных на использовании измерений псевдофаз и их приращений в ГНСС. // Сб. тезисов докладов научно-практической конференции молодых учёных и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2011» 26-30 апреля 2011 года, М.: МЭЙЛЕР, 2011, с. 45.

10. Отчёт по НИР «Исследование методов определения относительных координат движущихся объектов по псевдофазовым измерениям в ГНСС» / Этап 1, Москва, МАИ, 2009, 68 л., ил. // ЦИТИС инв. №02201051674 от 15.02.2010.

11. Отчёт по НИР «Исследование методов определения относительных координат движущихся объектов по псевдофазовым измерениям в ГНСС» / Этап 2, Москва, МАИ, 2009, 79 л., ил. // ЦИТИС инв. №02201056835 от 20.10.2010.

12. Отчёт по НИР «Комплекс» // Этап 2, Москва, ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем», 2010, 277 л., ил. // номер регистрации У91013, отчёт № К-06-11/10, инв. № 11/10.