НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

УДК 621.376

КАРУТИН СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

Разработка беспереборных методов раскрытия неоднозначности фазовых измерений в угломерной спутниковой радионавигационной аппаратуре

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства радионавигации, радиолокации и телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2003

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана и ФГУП "Российский Научно-исследовательский институт Космического Приборостроения"

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Власов И.Б.

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор Перов А.И.
кандидат технических наук, Слюсарев В.В.

Ведущая организация ФГУП "Научно-производственное объединение Прикладной Механики им. академика М.Ф. Решетнева"

У1661302
Карутин С.Н.
Разработка беспереборных методов раскрытия неоднозначности фазовых измерений в угломерной сп...
2003
0-00

на ... «11» февраля 2004 г. в 12 час. ... совета Д 212.141.11 в ...ическом Университете им. Н.Э. Баум... Бауманская ул., д.5, МГТУ им.

У 1661302

...еке МГТУ им.

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Б-ка МГТУ им. Н.Э. Баумана
1661302
Карутин С.Н Разработка бе

ФУПК

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. За время, прошедшее с момента создания спутниковых радионавигационных систем (СРНС) второго поколения – ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США), была экспериментально доказана возможность использования навигационного поля, создаваемого этими системами, для реализации высокоточных алгоритмов навигационно-временных определений (НВО) с использованием измерений фазы псевдодоплеровской частоты сигналов навигационных космических аппаратов (НКА), принимаемых навигационной аппаратурой потребителя (НАП). При этом становится возможным определение не только абсолютных и относительных координат точки нахождения потребителя, но и его пространственной ориентации (угловых координат). Достигнутая на настоящее время точность угловых определений с помощью построенной по принципу фазовой интерферометрии угломерной НАП СРНС имеет порядок нескольких угловых минут (СКО), что соответствует точности высококлассных гироскопических средств, традиционно применявшихся для определения угловой ориентации, при этом стоимость угломерной НАП оказывается в два-три раза ниже. Кроме того, угломерная НАП свободна от известных недостатков гироскопических систем, а именно, в ней отсутствует эффект деградации точности с увеличением времени измерений и имеется возможность коррекции сбоев в условиях автономной работы. Таким образом, угломерная НАП СРНС является весьма перспективным и практически важным видом спутниковой навигационной аппаратуры, что подтверждено опытом отечественных и зарубежных промышленных разработок.

Одной из важнейших задач, с которой сталкиваются разработчики базовых радиоинтерферометрических систем определения угловых координат и параметров движения объектов, является раскрытие неоднозначности измерения разности хода сигналов, т.к. однозначность измерений сохраняется только при разности хода меньше половины длины волны несущих колебаний. Большой вклад в разработку фундаментальных основ методов раскрытия неоднозначности внесли радиоастрономы Л.И. Матвеенко, С.С. Моисеев, Б. Ловел, Б. Берк и др.. За последние два десятилетия отечественными и зарубежными учеными получены существенные теоретические и практические результаты, позволившие создать много методов раскрытия неоднозначности измерений фазы псевдодоплеровской частоты сигналов НКА СРНС. Этим методам посвящены работы К.В. Пезина, А.А. Поваляева, И.А. Липкина, Б.В. Ремонди, Е. Фреи, Х.А. Абидина, П. Теуниссена и др..

Разработанные до настоящего времени методы раскрытия неоднозначности фазовых измерений в угломерной НАП предполагают, что для определения ориентации любой оси объекта используется только одна база. Многошкальные антенные системы реализуются только в том случае, когда необходимо определять ориентацию в трех плоскостях. При этом для рас-

МГТУ им. Н.Э. Баумана библиотека

крытия неоднозначности используются переборные методы, реализующие процедуру поиска максимально правдоподобной оценки параметра неоднозначности. Основными недостатками этих методов являются необходимость наблюдения как можно большего числа НКА (не менее 7), в то время как для решения задачи определения абсолютных координат потребителя достаточно измерений по 4 НКА. В том случае, когда для раскрытия неоднозначности привлекаются измерения, полученные в другие моменты времени дополнительно необходимо решать задачи обеспечения непрерывности слежения за сигналом НКА, обнаружения и исправления ошибок, вызванных перескоками в работе схем ФАПЧ несущей частоты.

От указанных недостатков свободны методы раскрытия неоднозначности, основанные на использовании свойств коллинеарного неэквидистантного многошкального интерферометра, широко применяемый в радиоастрономии и радиопеленгации. Если длину наименьшей базы выбрать меньше половины длины волны несущих колебаний, то можно обеспечить однозначность измерения разности хода на этой базе и используя известные методы решения систем линейных уравнений последовательно раскрывать неоднозначность и определять угловую ориентацию на остальных базах интерферометра. Ограничением для такого подхода в угломерной НАП является сложность построения антенной системы, удовлетворяющей указанным требованиям. Во-первых, геометрические размеры антенн, используемых для решения задач определения угловой ориентации, часто превосходят половину длины волны. Во-вторых, для обеспечения требуемой точности определения угловой ориентации необходимо, построение системы с более чем двумя базами. В тоже время, как будет показано ниже, в угломерной НАП требование однозначности измерения на малой базе не является обязательным, поскольку имеются другие источники получения информации о разности хода сигналов, что открывает новые возможности для использования многошкальных методов раскрытия неоднозначности в такой аппаратуре. Именно этот подход используется в данной работе.

Таким образом, актуальность данной работы определяется тем что, несмотря на большой научно-технический задел в вопросе раскрытия неоднозначности фазовых измерений в угломерной НАП, полностью данная задача в не исследована.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является анализ, разработка и исследование методов совершенствования характеристик угломерной навигационной аппаратуры на основе беспереборных методов раскрытия неоднозначности измерений фазы псевдодоплеровской частоты сигналов НКА СРНС ГЛОНАСС и GPS в угломерной НАП с многошкальной коллинеарной антенной системой.

При этом основное внимание уделено рассмотрению алгоритмов, позволяющих использовать только открытые сигналы СРНС (СТ в системе ГЛОНАСС и С/А в системе GPS), доступные широкому кругу потребителей.

По этой причине в диссертации не рассматриваются многочастотные методы раскрытия неоднозначности, предполагающие использование закрытых сигналов СРНС.

В работе решены следующие основные задачи:

1. проведен анализ современных подходов и достижений в вопросе решения задачи раскрытия неоднозначности измерений фазы псевдодоплеровской частоты в НАП, построенной по принципам радиоинтерферометрии, позволивший выявить неисследованные возможности по реализации процедуры раскрытия неоднозначности;
2. показана возможность привлечения измерений псевдодальности к решению задачи раскрытия неоднозначности фазовых измерений при реализации антенной системы НАП в виде радиоинтерферометра с коллинеарными неэквидистантными базами;
3. на основе данных анализа предложен метод раскрытия неоднозначности, позволяющий определять параметры ориентации объекта с частотой следования отсчетов первичных измерений (псевдодальности и фазы);
4. исследована зависимость количества баз в интерферометре от точности измерения радионавигационных параметров (псевдодальности и фазы) и подтверждена возможность сокращения количества баз и геометрических размеров интерферометра за счет повышения точности измерения псевдодальности путем сглаживания с помощью приращений измерений фазы псевдодоплеровской частоты;
5. исследованы особенности реализации разработанной бесперебороного метода раскрытия неоднозначности при использовании измерений по сигналам НКА системы ГЛОНАСС, использующей частотное разделение сигналов;
6. предложен способ обнаружения искажений измерений фазы, вызванных сбоями в работе схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), использующий возможности представленного метода раскрытия неоднозначности и не имеющий ограничений, обусловленных динамикой потребителя;
7. на основе полученных в работе результатов разработан алгоритм работы угломерной НАП, реализующий предложенный метод раскрытия неоднозначности;
8. проведено лабораторное исследование алгоритма работы угломерной НАП на серийно выпускаемых навигационных приемниках и представлены экспериментальные результаты.

Методы исследований. При решении поставленных задач в работе использован аппарат математического анализа, статистической радиотехники, теории вероятностей и случайных процессов, статистического моделирования, вычислительной математики и программирования. Программная реализация разработанного алгоритма раскрытия неоднозначности отлажена в среде программирования Microsoft Visual C++ 6.0.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые результаты, выносимые на защиту:

- бесперебoрный метод раскрытия неоднозначности фазовых измерений в угломерной НАП с многошкальной коллинеарной антенной системой, позволяющий отказаться от ограничения на однозначность фазового измерения на малой базе и учитывающий особенности использования измерений по сигналам системы ГЛОНАСС, использующей частотное разделение сигналов НКА;
- методика и соотношения для определения оптимальных параметров антенной системы угломерной НАП, учитывающие особенности использования одночастотных открытых сигналов спутниковых радионавигационных систем и позволяющие реализовывать бесперебoрную процедуру раскрытия неоднозначности;
- теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности сокращения размеров антенной системы за счет повышения точности измерения псевдодальности с помощью совместной обработки псевдодальномерных и фазовых измерений;
- обоснование необходимости калибровки НАП при раскрытии неоднозначности фазовых измерений по сигналам НКА системы ГЛОНАСС многошкальным методом с целью определения поправок к измерениям, вызванным неидентичностью характеристик группового времени запаздывания (ГВЗ);
- решающее правило процедуры начального определения параметров антенной системы (инициализации) угломерной навигационной аппаратуры;
- методика и результаты экспериментального исследования работоспособности разработанных методов раскрытия неоднозначности на опытном образце угломерной аппаратуры, реализующем предложенную структуру и алгоритм.

Практическая ценность работы. Разработан комплекс программ, позволяющий исследовать работу представленных в работе метода раскрытия неоднозначности и алгоритма работы угломерной НАП; оценивать вероятность правильного раскрытия неоднозначности при различном количестве видимых НКА (использовании сигналов как обоих СРНС ГЛОНАСС и GPS, так и отдельно), а также затенении трассы распространения сигналов НКА.

Разработаны методика оценки количества и длин баз, образующих антенную систему интерферометра, с учетом условий работы угломерной НАП и при заданной вероятности ошибки определения параметров ориентации объекта, и решающее правило процедуры начального определения параметров антенной системы.

Разработанное программное обеспечение, экспериментальный стенд, методики и рекомендации использованы при проведении научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР).

Реализация и внедрение результатов исследования. Результаты исследования и разработанное программное обеспечение использованы при выполнении НИР и ОКР по Федеральной целевой программе "Глобальная навигационная система", выполненных во ФГУП РНИИ КП и ФГУП ЦНИИ "Комета" в 1999-2003 годах, что подтверждено соответствующими документами.

Апробация результатов. Основные результаты доложены и обсуждены на следующих конференция: молодежная научно-техническая конференция "Радиолокация и связь – перспективные технологии" (Москва, 2003 г.), 9 международная конференция "Радиолокация, навигация и связь" (Воронеж, 2003 г.), 8 международная конференция "Системный анализ и управление" (Евпатория, 2003 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка литературы. Работа изложена на 111 страницах машинописного текста, содержит 24 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 52 названий.

Основное содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых в диссертационной работе вопросов, формулируется цель и направление исследований, определяется подход к решению рассматриваемой задачи раскрытия неоднозначности измерений фазы псевдодоплеровской частоты, аргументированы научная новизна и ценность результатов.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу принципов работы угломерной НАП.

Рассмотрены основные принципы решения задач высокоточного углового позиционирования с помощью измерений фазы псевдодоплеровской частоты в НАП, построенной по принципу радиоинтерферометра. При этом информация об ориентации объекта содержится в разностях первичных измерений навигационных параметров (первые, вторые или третьи разности).

Исходя из аппаратной архитектуры НАП, определены математические модели отсчетов измерений навигационных параметров – псевдодальности и псевдодоплеровской фазы.

Проведен анализ не компенсируемых при формировании первых и вторых разностей ошибок измерения псевдодальности и фазы псевдодоплеровской частоты. Получены оценки СКО возможных значений шумовых и динамических ошибок, а так же искажений, вызванных многолучевым характером распространения сигнала (табл. 1).

Приведена классификация методов раскрытия неоднозначности измерений фазы псевдодоплеровской частоты: по типу решаемых НАП задач (неподвижные и динамические потребители); по виду обработки информации (в реальном времени и постобработка); по видам используемых измерений (одно-, двухчастотные измерения фаз, совместные псевдодальномерные и фазовые измерения на одной или обеих частотах); по структуре антенных систем

$$N^{ij}_{d_2} = \text{entier}\left[\Delta_2\Phi^{ij}_{d_2} - \frac{d_2}{d_1}\cdot\left(\Delta_2\Phi^{ij}_{d_1} - N^{ij}_{d_1}\right)\right],$$

где $\Delta_2\Phi^{ij}_{d_2}$ - вторая разность отсчетов фазы на базе d_1.

Верхняя граница допустимого диапазона возможных значений отношения длин баз d_2 d_1 определяет выражением:

$$\frac{d_2}{d_1} \le \frac{\lambda - 4\cdot p_\alpha\cdot\sigma_\Phi}{4\cdot p_\alpha\cdot\sigma_\Phi}. \qquad (2)$$

Анализ результатов расчета по формулам (1) и (2) области возможных значений отношения длин баз, на основе данных таблицы 1, показал, что одновременное удовлетворение обоим условиям возможно при отношении длин базовых линий порядка 40 и вероятности порядка 0.75. Подобные параметры антенной системы существенно ограничивают возможности практического применения данного метода без принятия дополнительных мер, направленных на повышение точности измерения псевдодальности и фазы.

Предложены два метода повышения вероятности правильного раскрытия неоднозначности. Первый метод заключается в введении в состав антенной системы дополнительных баз. Это позволит опираться при выборе длин наибольшей и наименьшей баз только на неравенство (2). Определение параметров промежуточных баз будет производиться с учетом длины малой базы и неравенства (4). Общее количество коллинеарных неэквидистантных баз в интерферометре определяется исходя из значений СКО измерения псевдодальности и фазы и значения вероятности правильного раскрытия неоднозначности согласно выражению:

$$V \ge \lg\left[\frac{4\cdot p_\alpha\cdot\sigma_S}{\lambda - 4\cdot p_\alpha\cdot\sigma_\Phi}\right] \Big/ \lg\left[\frac{\lambda - 4\cdot p_\alpha\cdot\sigma_\Phi}{4\cdot p_\alpha\cdot\sigma_\Phi}\right].$$

Второй метод состоит в повышении точности измерения псевдодальности. Решать данную задачу предложено за счет сглаживания псевдодальномерных измерений совместно с измерениями фазы. Приращения псевдодальности на некотором временном интервале равны приращениям фазы, только фазовые измерения позволяют оценить его величину на три порядка точнее. Используя измерения псевдодальности, полученные в различные моменты времени, и приращения фазовых измерений можно получить несколько оценок текущего значения псевдодальности. При интервале между отсчетами, равном или превышающем интервал корреляции флюктуационной составляющей погрешности отдельных отсчетов, дисперсия оценки значения псевдодальности уменьшается пропорционально количеству используемых отсчетов.

Рассмотрены особенности применения предложенного метода в случае использования измерений по сигналам СРНС ГЛОНАСС, использующей частотный метод разделения сигналов. Показана необходимость определения поправок к первичным измерениям, учитывающих неидентичность характе-

ристик ГВЗ приемников, входящих в состав НАП. Для определения указанных поправок предложено проводить начальную калибровку приемных трактов приемников. Кроме того, следует отметить, что постоянство поправок к первичным измерениям в течение всего навигационного сеанса по сигналам системы ГЛОНАСС можно обеспечить при использовании общего опорного генератора для всех приемников, входящих в состав угломерной навигационной аппаратуры. Использование общего генератора при работе по сигналам системы GPS не является обязательным.

Необходимость учета поправок к измерениям, разности номиналов несущих частот сигналов НКА системы ГЛОНАСС и значений разности ухода шкал времени приемников относительно системного времени делает выражения для определения значения второй разности ПФН, оценки интервала возможных значений величины отношения длин баз и их количества в этом случае более громоздкими. Однако, данное обстоятельство не означает наличие принципиальных отличий в подходе к получению оценки ПФН для СРНС ГЛОНАСС.

В третьей главе диссертационной работы рассматривается структура и особенности работы отдельных блоков алгоритма работы угломерной НАП, реализующей многошкальный метод раскрытия неоднозначности.

Для реализации разработанной бесперебороной процедуры раскрытия неоднозначности необходима априорная информация о длине базовых линий интерферометра, которая определяется однократно при монтаже антенной системы НАП. При реализации автономной НАП, использующей только открытые сигналы СРНС, задачу определения длин базовых линий можно возложить непосредственно на навигационный комплекс. При проведении анализа методов раскрытия неоднозначности показано, что оптимальный алгоритм решения данной задачи может быть реализован с помощью переборных процедур определения ПФН, основанных на поиске минимума квадратичной формы $T(N) = (N - N^*)^T \cdot (N - N^*) \cdot Q_\phi^{-1} \cdot$, Параметры N^* и Q_ϕ формы T(N) определяются при решении методом наименьших квадратов системы уравнений первых или вторых разностей при допущении о вещественном характере N. Для рассматриваемых переборных процедур предложена реализация решающего правила, обеспечивающая заданную вероятность правильного раскрытия неоднозначности:

$$F_H^\alpha \le F(N_1) \le F_B^\alpha \quad \text{и} \quad T(N_2) - T(N_1) > F_{пор}$$

где $F(N) = T(N)\, s^2_{ост}$ - значение распределения Фишера, с M и L-M-3 степенями свободы; $s^2_{ост}$ - остаточная сумма квадратов разностей правой и левой частей системы уравнений первых или вторых разностей, при получении вещественных значений; M – размер вектора ПФН; L – размер вектора измерений; 3 – размер вектора координат; F_H^α, F_B^α - нижняя и верхняя границы распределения Фишера, соответствующие уровню значимости α степеням

свободы M и L-M-3; N_2, N_1 - пара значений вектора ПФН, при которых T(N) принимает минимальные значения; $F_{пор}$ - пороговое значение.

Показана возможность повышения вероятности правильного раскрытия неоднозначности при реализации переборных процедур раскрытия неоднозначности за счет избыточности измерений, достигаемой при использовании многошкальной коллинеарной антенной системы.

В общем случае при использовании измерений по сигналам НКА систем ГЛОНАСС и GPS для решения задачи раскрытия неоднозначности система уравнений, связывающая измерения с определяемыми навигационными параметрами характеризуется ковариационной матрицей W_1 и имеет вид:

$$\|y_1\| = \|C_1^x\| \cdot \|\Delta X\| + \|C_1^T\| \cdot \|\Delta T_1\| + \|A_1\| \cdot \|N_1\| + \|e_1\|, \qquad (3)$$

где $\|y_1\|$ - вектор первых разностей измеренных и расчетных значений псевдодальностей и фаз, размер $L_1 \times 1$; $\|\Delta X\|$ - вектор относительных координат, размер 3×1; $\|\Delta T\|$- вектор разностей уходов шкал и задержек в приемном тракте приемника, размер $V_1 \times 1$; $\|C_1^x\|$- матрица коэффициентов при относительных координатах, размер $L_1 \times 3$; $\|C_1^T\|$ - матрица коэффициентов при разностях уходов шкал и задержек в приемном тракте приемника, размер $L_1 \times V_1$; $\|N_1\|$ - вектор ПФН, размер $M_1 \times 1$; $\|A_1\|$- матрица коэффициентов при ПФН, размер $L_1 \times M_1$; $\|e_1\|$ - вектор ошибок измерений, размер $L_1 \times 1$.

Избыточность данной системы определяется как разность числа уравнений L_1 и числа неизвестных M_1, V_1 и 3. Используя априорную информацию об отношении длин базовых линий систему уравнений для второй базы можно записать в виде:

$$\|y_2\| = \|C_2^x\| \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \|\Delta X\| + \|C_2^T\| \cdot \|\Delta T_2\| + \|A_2\| \cdot \|N_2\| + \|e_2\|. \qquad (4)$$

Совместное решение систем (3) и (4) приводит к увеличению числа уравнений на L_2, а числа неизвестных на $M_2 + V_2$. В настоящее время размер рабочего созвездия системы GPS позволяет в отдельные моменты времени наблюдать до 12 НКА. Анализ зависимости избыточности измерений от количества НКА в случае использования одной и двух баз показывает, что двухшкальный интерферометр позволяет обеспечить максимально возможную для одношкального интерферометра избыточность (при наблюдении 12 НКА) при использовании измерений всего по 7 НКА. Такое количество НКА почти всегда находятся в зоне видимости НАП.

Предложенный способ позволяет альтернативным методом определить ПФН в угломерной НАП. Полученная информация может быть использована для дополнительной проверки достоверности результатов определения ПФН

согласно методу определения ПФН, предложенному в главе 2. Это позволит уменьшить в практических приложениях вероятность ошибки.

Исследована возможность привлечения к решению задачи беспереборного определения ПФН в НАП с многошкальной антенной системой максимально правдоподобных оценок относительных координат, получаемых с помощью однозначных измерений псевдодальности и фазы. В случае использования измерений псевдодальности данная процедура позволяет уменьшить значение ошибки измерения. Показана целесообразность использования данной процедуры на начальном этапе определения ПФН, когда сглаживание псевдодальномерных измерений по отдельным НКА не уменьшила ошибку измерения до требуемых значений.

На основании разработанного метода определения ПФН предложена усовершенствованная процедура обнаружения и исправления искажений, вызванных сбоем в работе схем ФАПЧ. Процедура является эффективной при любом количестве НКА, превосходящем минимально необходимое их число, и не имеет ограничений по динамике движения НАП.

В четвертой главе представлены методика и результаты экспериментального исследования предложенного многошкального метода определения ПФН и решающего правила процедуры раскрытия неоднозначности при проведении начального определения параметров антенной системы, проведена оценка вероятностей правильного определения ПФН при использовании антенн различных типов.

Испытания проводились на экспериментальном образце угломерной НАП, в состав которой входят: три 12-ти канальных параллельных навигационных приемника систем ГЛОНАСС/GPS с общим опорным генератором и управляющая ПЭВМ РСМ-3345. В ходе эксперимента антенная система НАП была развернута на крыше 6 этажного здания и жестко закреплена.

Исследование беспереборного метода раскрытия неоднозначности при работе с НКА системы GPS проводилось на двух типах антенн. Оба типа антенн относятся к классу геодезических антенн. Однако, применение в конструкции антенн первого типа фланца, представляющего собой семейство концентрических колец, являющихся четвертьволновыми трансформаторами, позволяет уменьшить прием сигналов отраженных от подстилающей поверхности, что делает данный тип антенн наиболее широко применяемым в тех случаях, когда стремятся максимально уменьшить аппаратную ошибку измерения. Второй тип является наиболее распространенным видом геодезических антенн, поскольку отказ от использования фланца, позволяет сократить их геометрические размеры и стоимость, при некотором ухудшении точности измерения навигационных параметров. Первый тип представлен антеннами Ashtech Choke Ring, второй - антеннами Javad MarAnt.

Согласно разработанной методике экспериментального исследования представленного метода определения ПФН на первом этапе производилась оценка СКО измерения навигационных параметров от количества отсчетов,

используемых при сглаживании, и угла места НКА (табл. 2) для обоих типов антенн.

На основании результатов оценки СКО от количества отсчетов при сглаживании было установлено, что использовать более 500 отсчетов не целесообразно, поскольку это практически не приводит к уменьшению СКО псевдодальности.

Используя полученные зависимости СКО измерения псевдодальности и фазы от угла места НКА системы GPS (табл. 2) для антенн Ashtech Choke Ring было выбрано отношение длин базовых линий 7.8 ($d_S \approx 3$ м и $d_\psi \approx 0.38$ м), что обеспечивает вероятность правильного раскрытия неоднозначности 0.95 при работе с НКА с углами места более 10°.

Таблица 2.

СКО (в периодах несущей частоты) псевдодальности и фазы от угла места НКА

Тип антенн	Тип измерений		Диапазон углов								
			<5°	5-10°	10-20°	20-30°	30-40°	40-50°	50-60°	60-70°	>70°
1	Вторая разность псевдодальностей	Единичные измерения	35.11	26.64	14.7	10.61	8.03	6.68	6.05	5.67	5.39
		Сглаживание по 500 отсчетам	8.91	7.99	1.84	1.31	1.14	1.07	0.86	0.73	0.64
	Вторая разность фаз (СКО)		0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.018	0.016	0.014	0.013
2	Вторая разность псевдодальностей	Единичные измерения	35.37	29.98	25.66	22.51	18.05	14.92	13.10	12.27	11.52
		Сглаживание по 500 отсчетам	10.01	9.06	3.81	2.93	1.99	1.69	1.52	1.17	0.72
	Вторая разность фаз		0.087	0.082	0.077	0.063	0.047	0.045	0.039	0.031	0.026

Результаты эксперимента (рис.2) подтвердили правильность теоретических расчетов – вероятность правильного раскрытия неоднозначности при использовании антенн 1 типа и НКА с углами места больше 10° составила величину порядка 0.95.

Снижение вероятностей правильного раскрытия неоднозначности при использовании антенн 2 типа связано с ухудшением точности измерения навигационных параметров. Однако совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей вероятности раскрытия неоднозначности от угла места

НКА подтверждает правильность полученных в работе выражений для оценки ПФН.

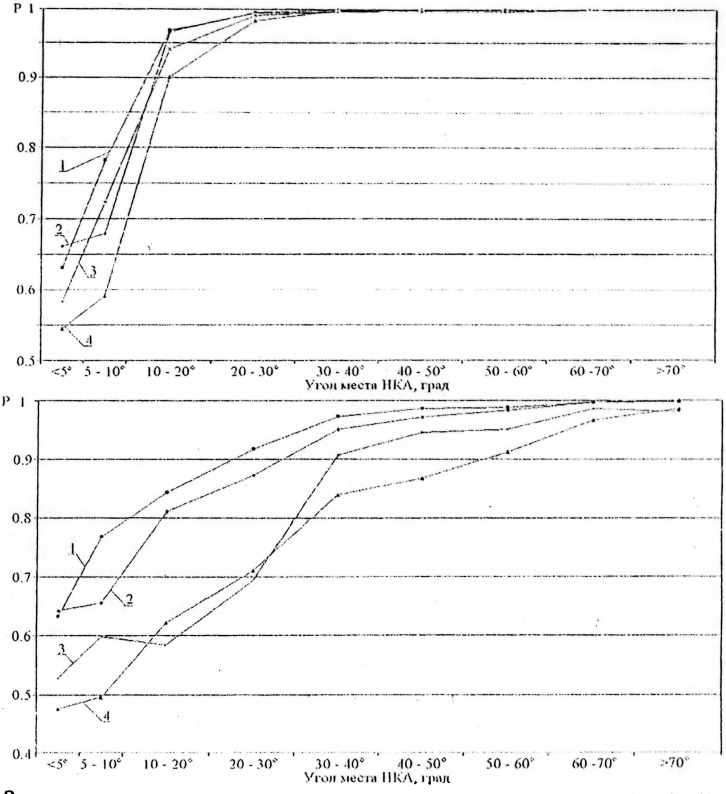


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного раскрытия неоднозначности от угла места НКА GPS: а) антенны 1 типа б) антенны 2 типа. Оценка с помощью измерений псевдодальности: 1 – эксп., 2 –теор.; Оценка с помощью измерений псевдодальности и фазы: 3 – эксп., 4 – теор.

Экспериментальное исследование беспереборной процедуры раскрытия неоднозначности по сигналам системы ГЛОНАСС проводились с использованием антенн 1 типа и состояло из двух этапов. В ходе первого этапа проводилась калибровка навигационного приемника с целью определения не идентичности характеристик группового времени запаздывания (ГВЗ) в приемниках.

Полученные результаты (рис.3) показывают, что математическое ожидание искажений вторых разностей псевдодальномерных измерений, определяемых не идентичностью характеристик ГВЗ, постоянно при работе по одной антенне (рис. 3 участок 1) и на разнесенные антенны (рис. 3 участки 2 и 3) в различные моменты времени. Это подтверждает, что при использовании общего опорного генератора достаточно один раз определить поправки к

первичным измерениям, учитывающие неидентичность характеристик ГВЗ приемников, входящих в НАП.

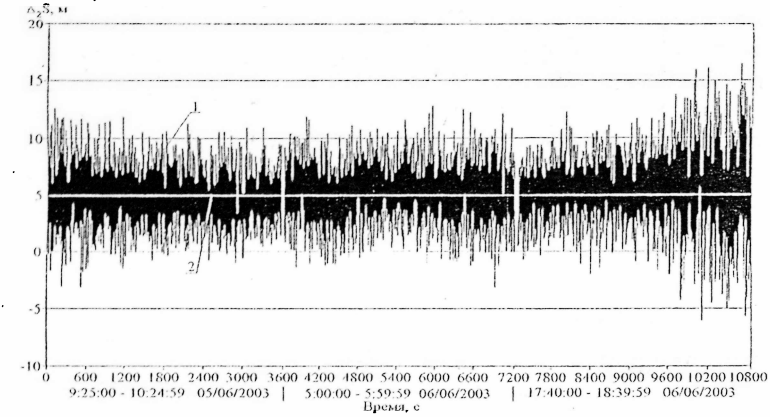


Рис. 3. Зависимость второй разности измерений псевдодальности для 5 и 21 НКА ГЛОНАСС в ходе трех навигационных сеансов: 1- единичные первичные измерения, 2 – математическое ожидание

Вторая часть эксперимента заключалась в оценке вероятности правильного определения ПФН в двухшкальном интерферометре с использованием поправок, определенных в ходе калибровки поправок к измерениям. Исследование проводились при тех же параметрах антенной системы, что при исследовании работы по сигналам системы GPS. Некоторое ухудшение вероятности правильного раскрытия неоднозначности (рис. 4) по сравнению с результатами, полученными при работе по сигналам НКА системы GPS (рис. 2а), связано с тем, что из-за структуры навигационного сигнала системы ГЛОНАСС точность измерения псевдодальности ниже, чем у системы GPS (табл. 1). При этом вероятность правильного раскрытия неоднозначности превысила 0.8 при использовании НКА ГЛОНАСС с углами места более 10°.

Для экспериментального исследования предложенного решающего правила процедуры начального определения параметров антенной системы и сравнения его с правилом, предложенным в работах МАИ были использованы массивы первичных измерений, полученные при проведении испытания разработанной бесперебороной процедуры.

Полученные результаты (рис. 5) показывают, что предложенное решающее правило обеспечивает вероятность правильного определения параметров фазовой неоднозначности не менее 0.95 при использовании измерений по 7 НКА системы GPS при использовании любого типа антенн. Привлечение измерений по сигналам системы ГЛОНАСС позволяет обеспечить заданную вероятность правильного раскрытия неоднозначности за счет увеличения числа измерений (избыточности). Кроме того, по сравнению с существующим правилом удается на 30-70% повысить вероятность пра-

вильного раскрытия неоднозначности при работе по рабочим созвездиям малых размеров (5-6 НКА).

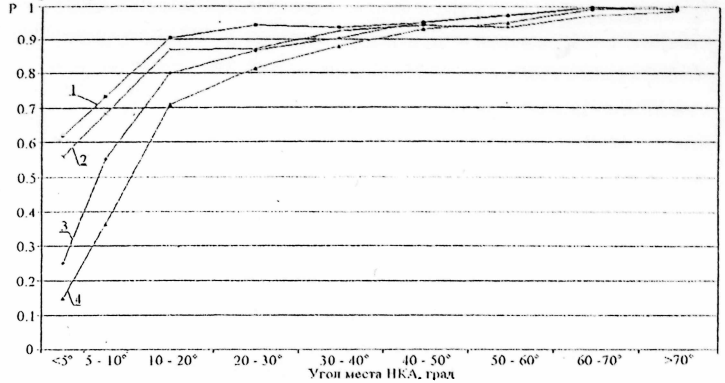


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного раскрытия неоднозначности от угла места НКА ГЛОНАСС. Оценка с помощью измерений псевдодальности: 1 – эксп., 2 – теор.; Оценка с помощью измерений псевдодальности и фазы: 3 – эксп., 4 – теор.

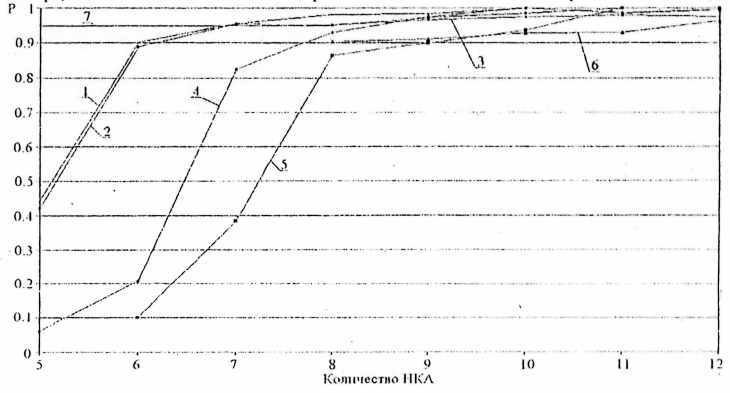


Рис. 5. Зависимость вероятности правильного раскрытия неоднозначности от количества НКА: предложенное решающее правило: 1 – система GPS антенны 1 типа, 2 – система GPS антенны 2 типа, 3 – системы GPS и ГЛОНАСС антенны 2 типа; существующее правило: 4 – система GPS антенны 1 типа, 5 – система GPS антенны 2 типа, 6 – системы GPS и ГЛОНАСС антенны 2 типа; 7 – порог

Основные результаты работы

1. Разработан бесперебороный метод раскрытия неоднозначности фазовых измерений и получены выражения, позволяющие производить оценку параметров фазовой неоднозначности в угломерной навигационной аппаратуре с многошкальной антенной системой, образованной коллинеарными неэквидистаными базами.
2. Решена задача выбора оптимальной структуры и параметров антенной системы угломерной навигационной аппаратуры, позволяющей реализовать предложенную бесперебороную процедуру.

3. Показано, что при использовании предложенной процедуры раскрытия неоднозначности для определения ориентации объекта могут привлекаться те же НКА, которые используются для решения стандартной навигационной задачи (не менее 4 НКА при работе по одной системе).
4. Установлена необходимость определения поправок к первичным измерениям с целью учета не идентичности характеристик ГВЗ приемников сигналов НКА системы ГЛОНАСС для реализации разработанного бесперебороного метода.
5. Предложено использовать алгоритмы сглаживания псевдодальномерных измерений с помощью приращений измерений фазы для повышения вероятности правильного раскрытия неоднозначности и сокращения геометрических размеров антенной системы.
6. Экспериментально подтверждена возможность практической реализации бесперебороной процедуры раскрытия неоднозначности в двухбазовом интерферометре с вероятностью не хуже 0.95 для GPS и 0.8 для ГЛОНАСС при работе с НКА с углами места более 10°.
7. Показано, что с точки зрения простоты и минимизации стоимости аппаратуры, реализующей предложенный бесперебороный метод раскрытия неоднозначности, целесообразно строить угломерную навигационную аппаратуру путем комплексирования стандартных навигационных приемников с использованием общего опорного генератора.
8. Разработано решающее правило, обеспечивающее вероятности правильного раскрытия неоднозначности не менее 0.95 при использовании не менее 7 НКА и позволяющее повысить вероятность правильного раскрытия неоднозначности на 30-70% при работе по рабочим созвездиям малых размеров (5 – 6 НКА).

Основные работы по теме диссертации

1. Власов И.Б., Карутин С.Н. Алгоритм определения малых относительных перемещений с помощью приемников спутниковых радионавигационных систем // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение, 2002. – № 2. – С. 28-36.
2. Карутин С.Н. Бесперебороные методы раскрытия неоднозначности измерений фазы псевдодоплеровской частоты сигналов СРНС // Радиолокация и связь – перспективные технологии.: Тез. докл. конф. – Москва, 2003. – С. 115-118.
3. Власов И.Б., Карутин С.Н. Одномоментный бесперебороный метод раскрытия неоднозначности измерений фазы псевдодоплеровской частоты сигналов СРНС GPS // Радиолокация, навигация, связь.: Тез. докл. Всерос. конф. – Воронеж, 2003. – С. 1639-1645.
4. Карутин С.Н. Бесперебороный метод раскрытия неоднозначности измерений фазы псевдодоплеровской частоты сигналов СРНС // Системный анализ и управление.: Тез. докл. Межд. конф. - Евпатория, 2003. – С. 113-114.