

Кочкин Дмитрий Евгеньевич

**Модели и алгоритмы повышения точности оценки  
относительного положения и ориентации наземных объектов  
по измерениям систем типа ГЛОНАСС**

05.13.18 — математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре программного обеспечения и администрирования информационных систем Воронежского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Артемов Михаил Анатольевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
**Алексеев Владимир Витальевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Бобрешов Анатолий Михайлович**

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»

Защита состоится « 30 » июня 2010 г. в 15<sup>10</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.038.20 при Воронежском государственном университете по адресу: 394006, г. Воронеж, Университетская пл., 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Воронежского государственного университета.

Автореферат разослан « 28 » мая 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.038.20  
кандидат физ.-мат. наук, доцент

Провоторов В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** С развитием средств радиосвязи все более актуальным для обороноспособности страны становится локализация положения незарегистрированных источников радиоизлучения. Решением этой задачи занимаются службы радиомониторинга, использующие специальные пеленгационные комплексы. В состав аппаратуры комплекса должна входить навигационная система, определяющая его положение и ориентацию. Оптимальным выбором при этом оказываются глобальные спутниковые радионавигационные системы (СРНС) типа ГЛОНАСС. Актуальность и важность проведения научных исследований для таких систем подтверждается Федеральной целевой программой «Глобальная навигационная система».

Данные о координатах комплекса, поступающие от навигационных приемников СРНС, подходят для применения службами радиомониторинга, а при использовании данных об ориентации объекта возникают следующие проблемы:

- невозможно определить ориентацию неподвижного объекта;
- измеряется направление движения объекта, а не ориентация;
- не измеряется наклон платформы;
- данные для определения ориентации доступны с запаздыванием до 2 сек.

Для расширения области применимости СРНС и повышения точности решения в работе предлагается использование фазовых измерений приемников СРНС. Распространенная модель фазовых измерений (см. работы Харисова В.Н., Дмитриева С.П. и др.) адаптируется для решения двух задач: высокоточной оценки относительного положения наземных объектов и оценки ориентации неподвижного объекта.

При решении этих задач осуществляется накопление данных для нескольких временных отсчетов, что приводит к появлению переопределенной системы уравнений. При решении этой системы возникают две основные сложности: во-первых, значения части неизвестных должны быть определены в пространстве целых чисел, во-вторых, наличие шумов и ошибок в работе аппаратуры приемника приводит к тому, что сами измерения нуждаются в предварительной обработке до их использования в системе. Таким образом, разработка алгоритмов для решения рассматриваемых задач должна осуществляться с применением методов математического моделирования.

**Степень разработанности проблемы.** Применение фазовых измерений СРНС для повышения точности рассматривается как отечественными, так и зарубежными учеными. Хотя в отечественной литературе и есть ряд работ, заслуживающих внимания (например, работы таких авторов, как Соловьев Ю.А., Антонович К.М., Сурков Д.М., Харисов В.Н., Дмитриев С.П., Степанов О.А. и др.), в целом отечественные научные исследования по этой проблематике находятся в стадии развития. Существенный вклад в развитие данного направления внесен учеными из Канады, США, Нидерландов и ряда других стран.

В спутниковой геодезии существует ряд методов, ограниченно применимых при решении рассматриваемых задач. Необходимость адаптации существующих и разработки собственных моделей и методов при решении задач в радиомониторинге вызвана следующими особенностями в постановке задач. Во-первых, отношение погрешности фазовых измерений к длине волны отличается у геодезических и навигационных приемников на порядок, что делает невозможным применение стандартных геодезических методик. Во-вторых, измерения для решения геодезических задач могут проводиться в наиболее благоприятные моменты исходя из особенностей спутниковой группировки. В-третьих, при решении геодезических задач ограничения по затрачиваемому времени являются менее значительными.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является анализ и синтез ма-

тематической модели фазовых измерений СРНС, реализация ее в виде комплекса методов и программ для повышения точности оценки относительного положения и ориентации наземных объектов. При достижении поставленной цели решены следующие задачи:

1. Исследование математической модели фазовых измерений сигналов СРНС, методов предварительной обработки фазовых измерений и методов определения целочисленных неоднозначностей фазовых измерений сигналов СРНС.

2. Разработка алгоритма для решения задачи оценки относительного положения наземных объектов с помощью СРНС.

3. Разработка алгоритма для решения задачи оценки ориентации объекта с помощью СРНС.

4. Разработка комплекса программ, реализующего алгоритмы, разработанные в пп. 2 и 3.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются глобальные спутниковые радионавигационные системы (СРНС).

Предметом исследований являются:

- модель фазовых измерений сигналов СРНС;
- методы предварительной обработки фазовых измерений сигналов СРНС;
- методы определения целочисленных неоднозначностей фазовых измерений сигналов СРНС.

**Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследований.** Методологической основой исследования являются системный подход, а также различные методы: математического моделирования, вычислительной математики, математической статистики. Теоретической базой исследования послужили фундаментальные и прикладные исследования в области космической навигации, геодезии, радиофизике; официальный интерфейсный контрольный документ «ГЛОНАСС», утвержденный Федеральным космическим агентством; материалы международных научных конференций по исследуемой проблеме. Эмпирической базой исследования являются фазовые измерения сигналов СРНС, а также модели и методы, используемые при работе с этими измерениями.

**Научные результаты, выносимые на защиту.** Анализ математической модели вторых разностей фазовых измерений, позволяющий говорить о наличии периодических составляющих, отсутствующих в исходной модели. Выполнена оценка матрицы коэффициентов решаемой системы уравнений, показавшая ее хорошую обусловленность на рассматриваемых интервалах накопления данных.

Разработан алгоритм для решения задачи высокоточной оценки относительного положения подвижных наземных объектов с помощью СРНС. Для алгоритма определены условия корректной работы по следующим параметрам: интервал накопления данных, количество спутников, характеристики периодических составляющих модели.

Разработан алгоритм для решения задачи оценки ориентации объекта с помощью СРНС. Для алгоритма определены точность стационарного определения азимута, минимальный временной интервал накопления. Выполнена оценка вероятности ложного срабатывания для критериев оценки достоверности решения, показавшая практическую невозможность ошибок такого рода.

Разработан комплекс программ для высокоточной оценки относительного положения и ориентации наземных объектов.

**Научная новизна.** В работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Модель фазовых измерений сигналов СРНС для распространенных моделей приемников. Предложенное представление отличается от известных наличием дополнительных периодических составляющих, что позволяет спроектировать алгоритмы таким образом, чтобы повысить точность результатов.

2. Алгоритм высокоточной оценки относительного положения наземных объектов. Алгоритм основан на разработанной модели фазовых измерений СРНС и характеризуется методами предварительной обработки фазовых измерений и методом определения целочисленных неоднозначностей.

3. Алгоритм оценки ориентации наземного объекта с помощью фазовых измерений СРНС. Особенности алгоритма являются введение дополнительных уравнений для более быстрого получения решения в стационарном варианте и наличие критериев оценки достоверности полученного решения.

4. Комплекс программ высокоточной оценки относительного положения и ориентации наземных объектов.

**Теоретическая значимость** работы заключается в предложенных методиках решения переопределенных систем линейных уравнений в пространстве  $R^m \times Z^n$ , а также в методах предварительной обработки зашумленных измерений.

**Практическая значимость.** Разработанный комплекс программ для решения задачи высокоточной оценки относительного положения наземных объектов и задачи оценки ориентации объекта успешно применяется для навигационной поддержки систем радиомониторинга. Полученные результаты могут найти применение в геодезических работах для обработки измерений, выполненных в условиях неоптимальной конфигурации спутников СРНС, например, при работе в условиях высотной городской застройки.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Представленная диссертация посвящена исследованию моделей и разработке алгоритмов для решения задач оценки относительного положения и ориентации наземных объектов с использованием измерений спутниковых навигационных систем типа ГЛОНАСС.

Область диссертационного исследования включает применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических прикладных проблем, исследования математических моделей физических и технических объектов.

Указанная область исследования соответствует формуле специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки), а именно:

– п. 5 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»;

– п. 6 «Комплексное исследование научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

**Реализация и внедрение результатов.** Алгоритм, используемый для решения задачи оценки ориентации объекта с использованием СРНС, реализован как в аппаратном, так и в программном варианте. В настоящее время программно-аппаратная реализация внедрена в комплексах радиоконтроля ЗАО «ИРКОС» «Портативный пеленгатор АРТИКУЛ-П17 НАЛС.464349.125» и «Мобильная станция радиомониторинга и пеленгования «АРГУМЕНТ» НАЛС.464349.128», что подтверждено актом внедрения. Алгоритм, используемый для решения задачи высокоточной оценки относительного

положения наземных объектов с использованием СРНС, реализован в программном варианте.

**Апробация работы.** Основные результаты по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на VII, VIII и IX Всероссийской научно-технической конференции «Авиакосмические технологии» (Воронеж, 2006, 2007, 2008), на XI и XV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2005, 2009), на Международной научно-технической конференции «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами (Инноватика)» (Москва, 2007, 2008), на IX Международной научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века» (Воронеж, 2008), на IX Всероссийской научно-технической конференции «Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования» (Тамбов, 2009), на Международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 2009).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах, из них 4 — в изданиях из перечня ВАК РФ. В статьях, написанных в соавторстве, личный вклад автора состоит в анализе моделей, разработке алгоритмов и комплексов программ для работы с СРНС.

**Структура диссертации.** Материал диссертационной работы изложен на 139 страницах. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержит 43 рисунка и 9 таблиц. Библиография включает 107 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы объект, предмет, цели и основные задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены данные по апробации и краткое содержание работы.

**В первой главе** приведены постановки задач, решаемых в работе. Описано устройство, принципы работы и использование GPS/ГЛОНАСС приемников в навигационных системах комплексов радиоконтроля. Выполнен аналитический обзор литературных данных по работам, посвященным исследованию и применению СРНС. Предложены следующие требования к навигационной системе в задачах радиомониторинга:

- Решения задачи высокоточной оценки относительного положения наземных объектов с точностью 5 см.
- Решение задачи оценки ориентации объекта с точностью 0,5 градуса.

**Во второй главе** рассмотрены основные математические модели, используемые в работе.

В первом разделе главы рассмотрена модель задачи высокоточной оценки относительного положения. Пусть имеется два приемника сигналов СРНС (см. рис. 1). Требуется определить вектор направления от одного приемника к другому (вектор базовой линии). Вектор должен быть определен в относительных координатах в геодезической системе координат. Опишем математическую модель, используемую при решении задачи оценки относительного положения. Модель предложена Ченгом в публикациях, посвященных задаче определения целочисленных неоднозначностей.

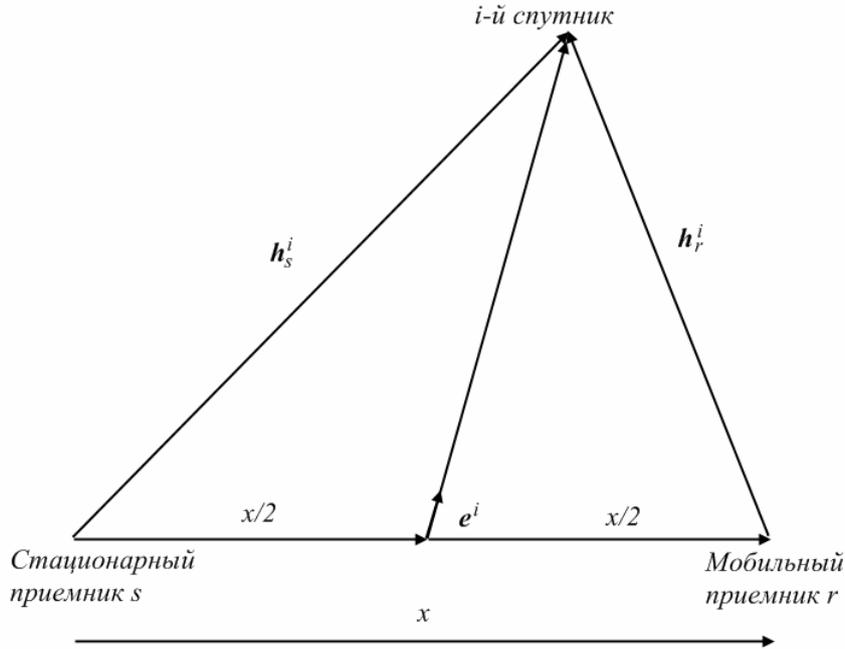


Рис. 1. Геометрическая модель задачи оценки относительного положения. Введем следующие обозначения:

- $\mathbf{h}_s^i, \mathbf{h}_r^i$  — вектор от приемника  $s$  ( $r$ ) к спутнику  $i$ ;
- $\mathbf{e}^i$  — единичный вектор от средней точки базовой линии к спутнику  $i$ ;
- $\rho_s^i, \rho_r^i$  — расстояние от приемника  $s$  ( $r$ ) до спутника  $i$  в длинах волн;
- $\lambda^i$  — длина волны на частоте спутника  $i$ ;
- $\|\cdot\|$  — евклидова норма ( $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}$ );
- $\mathbf{x}$  — искомый вектор относительного положения.

Имеем:

$$\mathbf{x} = \mathbf{h}_s^i - \mathbf{h}_r^i, \quad \mathbf{e}^i = \frac{\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}/2}{\|\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}/2\|} = \frac{\mathbf{h}_s^i + \mathbf{h}_r^i}{\|2\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|}, \quad \text{откуда:}$$

$$\left(\|2\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\| \mathbf{e}^i\right)^T \mathbf{x} = \|\mathbf{h}_s^i\|^2 - \|\mathbf{h}_r^i\|^2 = \left(\|\mathbf{h}_s^i\| - \|\mathbf{h}_r^i\|\right) \left(\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{h}_r^i\|\right) = \lambda^i (\rho_s^i - \rho_r^i) \left(\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|\right).$$

Оставляя в правой части уравнения  $\lambda^i (\rho_s^i - \rho_r^i)$  получаем следующее уравнение:

$$\left(\omega^i \mathbf{e}^i\right)^T \mathbf{x} = \lambda^i (\rho_s^i - \rho_r^i), \quad \text{где } \omega^i \equiv \frac{\|2\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|}{\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|}, \quad \text{а значит } \omega^i \mathbf{e}^i = \frac{2\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}}{\|\mathbf{h}_s^i\| + \|\mathbf{h}_s^i - \mathbf{x}\|}.$$

Оценка весового коэффициента  $\omega^i$  близка к 1, и в нашей задаче будем полагать его равным 1.

Второй раздел главы посвящен моделям спутниковых измерений, их первым и вторым разностям.

В работе используется следующая общепринятая в спутниковой навигации математическая модель фазовых измерений:

$$\phi_s^i(t_k) = \rho_s^i(t_k) - I_s^i(t_k) + T_s^i(t_k) + N_s^i + f^i [\delta t_s(t_k) - \delta t^i(t_k - \tau_s^i)] + \mu_s^i(t_k),$$

где

- $t_k$  — время поступления сигнала от спутника  $i$  на приемник  $s$ .

- $\tau_s^i$  — время прохождения сигнала от спутника  $i$  до приемника  $s$ .
- $\phi_s^i(t_k)$  — измерение фазы несущей сигнала в момент времени  $t_k$ .
- $\rho_s^i(t_k)$  — расстояние между приемником  $s$  в момент времени  $t_k$  и спутником  $i$  в момент времени  $t_k - \tau_s^i$ .
- $I_s^i(t_k)$  — ионосферная ошибка дальности в момент времени  $t_k$ .
- $T_s^i(t_k)$  — тропосферная ошибка дальности в момент времени  $t_k$ .
- $N_s^i$  — целочисленная неоднозначность (она характеризует неопределенное целое число полных периодов несущей частоты между спутником и приемником в момент захвата сигнала и возникает вследствие особенностей работы аппаратуры приемника).
- $f^i$  — несущая частота сигнала спутника  $i$ .
- $\delta t_s(t_k)$  — ошибка часов приемника в момент времени  $t_k$ .
- $\delta t^i(t_k - \tau_s^i)$  — ошибка часов спутника в момент времени  $t_k - \tau_s^i$ .
- $\mu_s^i(t_k)$  — погрешность измерения фазы несущей сигнала, включая ошибки многолучевого распространения, в момент времени  $t_k$ .

На основе представленной модели фазовых измерений формируется первая разность фазовых измерений, как разность измерений для двух разных приемников. Затем один из спутников принимается за главный (его называют ведущим), и для каждого из спутников формируется вторая разность фазовых измерений вычитанием первой разности рассматриваемого спутника и первой разности ведущего спутника. Без ограничения общности далее будем полагать его индекс нулевым. Т.к. в системе ГЛОНАСС у каждого из спутников своя частота, необходимо привести уравнения к одинаковым единицам измерения, для этого обе части уравнений умножаются на длину волны ведущего спутника  $\lambda^0$ . В результате получаем систему уравнений для вторых разностей измерений в следующем виде:

$$\Delta y_k^j = \Delta \mathbf{E}_k^j \mathbf{x}_k + \Delta a^j + \Delta v_k^j, j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где

- $\Delta y_k^j = \lambda^0 (y_k^0 - y_k^j)$  — вторая разность фазовых измерений.
- $\Delta \mathbf{E}_k^j = \mathbf{e}_k^0 - \mathbf{e}_k^j \frac{\lambda^0}{\lambda^j}$  — разность направлений на спутники.
- $\mathbf{x}_k$  — вектор базовой линии в задаче оценки относительного положения.
- $\Delta a = \lambda^0 (a^0 - a^j)$  — вторая разность неоднозначностей фазовых измерений.
- $\Delta v_k^j = \lambda^0 (v_k^0 - v_k^j)$  — вторая разность погрешностей фазовых измерений.

Далее в разделе приведены примеры реальных первых и вторых разностей.

В третьем разделе главы выполнен анализ проблемы определения неоднозначностей. Получена математическая модель для определения целочисленных неоднозначностей методом перебора в виде (здесь и далее индекс приемника  $j$  опускается, и система (1) рассматривается в векторном виде):

$$\min_{\Delta a} \left\| \mathbf{R}^{-1/2} (\Delta \mathbf{E}_k (\Delta \mathbf{E}_k^T \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{E}_k)^{-1} \Delta \mathbf{E}_k^T \mathbf{R}^{-1} - \mathbf{I}) (\Delta \mathbf{y}_k + \Delta a) \right\|,$$

здесь  $\mathbf{R}$  — матрица корреляции вторых разностей,  $\mathbf{I}$  — единичная матрица.

Предложены следующие ограничения на диапазон неоднозначностей:

$$\Delta \mathbf{a} \in [\Delta \mathbf{E} \mathbf{x}_0 - \Delta \mathbf{y} - |\alpha| \cdot \|\Delta \mathbf{E}\|^2 - \max |\Delta \mathbf{v}|, \Delta \mathbf{E} \mathbf{x}_0 - \Delta \mathbf{y} + |\alpha| \cdot \|\Delta \mathbf{E}\|^2 + \max |\Delta \mathbf{v}|],$$

где

- $\mathbf{x}_0$  — вектор начального приближения, определяемый по стандартным данным навигационного приближения;
- $\alpha$  определяется по следующей формуле ( $c_x, c_y, c_z$  — размеры ограничивающего эллипсоида):

$$\alpha = \pm \sqrt{\left( \frac{(\Delta E_x)^2}{c_x^2} + \frac{(\Delta E_y)^2}{c_y^2} + \frac{(\Delta E_z)^2}{c_z^2} \right)^{-1}}.$$

Показано, что при подобном подходе к поиску неоднозначностей получение результатов за приемлемое время невозможно, поэтому для определения неоднозначностей предложен следующий подход: 1) накопление данных за достаточно большой интервал времени; 2) решение полученного уравнения в вещественных числах методом наименьших квадратов с последующим перебором в небольшом диапазоне.

В четвертом разделе главы рассмотрена модель задач определения ориентации объекта. Приведены дополнительные уравнения, которые можно использовать для случая неподвижного объекта, помимо уравнения (1):

$$\frac{d\Delta \mathbf{y}_k}{dt} = \mathbf{x}^T \frac{d\Delta \mathbf{E}_k}{dt} + \Delta \mathbf{v}_k. \quad (2)$$

**В третьей главе** подробно описаны разработанные алгоритмы.

В первом разделе главы описан разработанный автором многоэтапный алгоритм, позволяющий решить задачу оценки относительного положения наземных объектов с соблюдением требуемой точности, несмотря на недостатки используемой аппаратуры.

Структурная схема алгоритма приведена на рис. 2.

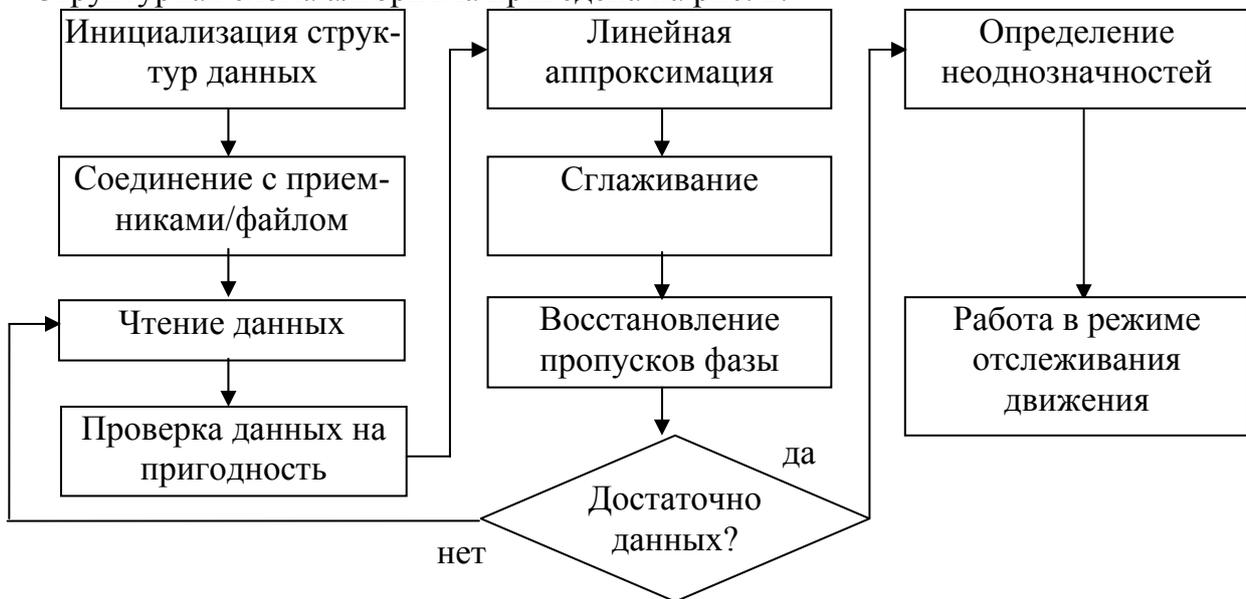


Рис. 2. Блок-схема работы алгоритма оценки относительного положения.

Во втором разделе главы представлен разработанный автором алгоритм решения задачи оценки ориентации объекта со следующими особенностями: учет внешних ограничений на объем памяти и быстродействие, выполнение оценки достоверности решения. Алгоритм позволяет решить задачу с соблюдением требуемой точности.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Линейная аппроксимация измерений вторых разностей по методу наименьших квадратов на небольших интервалах времен.

2. Определение начального приближения в случае неизвестных неоднозначностей. Реализуется перебором по множеству допустимых значений угла места  $um$  и азимута  $az$  с шагом в 2 градуса. При переборе фиксируются различающиеся комбинации неоднозначностей и определяется

$$\min_{um, az} \left\| \mathbf{x}^T \Delta \mathbf{E} - \Delta \mathbf{y} - \Delta \mathbf{a} \right\|. \quad (3)$$

После выбора начального приближения, значения неоднозначностей фиксируются выбором ближайших целочисленных.

3. Вычисление решения при условии фиксированных неоднозначностей.

На данном шаге в качестве значений неоднозначностей в уравнениях (1) принимают значения неоднозначностей из предыдущего шага. Тогда система уравнений (1) и (2) переопределена и может быть разрешена относительно неизвестных  $az$  и  $um$ . Таким образом, имеем систему нелинейных алгебраических уравнений (ведущий спутник имеет нулевой номер):

$$\begin{aligned} (\mathbf{E}_i - \mathbf{E}_0)^T \mathbf{x} &= \Delta \mathbf{y}_k - \Delta \mathbf{a} + \Delta \mathbf{v}_k = z_i, \\ \left( \frac{d\mathbf{E}_i}{dt} - \frac{d\mathbf{E}_0}{dt} \right)^T \mathbf{x} &= \frac{d\Delta \mathbf{y}_k}{dt} + \Delta \mathbf{v}_k = \dot{z}_i, i = \overline{1, m-1} \end{aligned} \quad (4)$$

Система решается методом наименьших квадратов с весами измерений, полученными при построении линейной аппроксимации. Качество полученного решения определяется по невязке правой части.

Учитывая нелинейность задачи, решение получается с помощью итерационного процесса. Обозначим через  $\mathbf{u} = (um, az)^T$ , тогда уравнения (4) можно записать в виде:

$$F(\mathbf{u}) = \mathbf{z},$$

где:

$$F(\mathbf{u}) = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_0 \\ \dot{\mathbf{E}}_1 - \dot{\mathbf{E}}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{E}_{m-1} - \mathbf{E}_0 \\ \dot{\mathbf{E}}_{m-1} - \dot{\mathbf{E}}_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\mathbf{x}| \cos(um) \cos(az) \\ |\mathbf{x}| \cos(um) \sin(az) \\ \vdots \\ |\mathbf{x}| \sin(um) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ \dot{z}_1 \\ \vdots \\ z_{m-1} \\ \dot{z}_{m-1} \end{pmatrix}$$

Пусть  $\mathbf{u}_s$  — некоторое приближение к  $\mathbf{u}$ , тогда один шаг итерационного процесса представим в виде

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial F(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_s} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) &= \mathbf{z} - F(\mathbf{u}_s), \\ \frac{\partial F(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} &= \begin{pmatrix} \mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_0 \\ \dot{\mathbf{E}}_1 - \dot{\mathbf{E}}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{E}_{m-1} - \mathbf{E}_0 \\ \dot{\mathbf{E}}_{m-1} - \dot{\mathbf{E}}_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -|\mathbf{x}| \sin(um) \cos(az) & -|\mathbf{x}| \cos(um) \sin(az) \\ -|\mathbf{x}| \sin(um) \sin(az) & |\mathbf{x}| \cos(um) \cos(az) \\ \vdots & \vdots \\ |\mathbf{x}| \cos(um) & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Система (5) является переопределенной линейной системой и решается методом наименьших квадратов.

4. Оценка достоверности решения. Для полученного решения выполняется оценка достоверности с помощью разработанного автором набора критериев. Критерии оптимизированы с целью недопущения ложных определений. Скорость определения имеет меньший приоритет. При решении задачи используется следующий подход: проводятся независимые определения углов на интервалах длиной 30 с. Первым 5 минимумам одного интервала в уравнении (3) присваиваются веса 5, 4, 3, 2, 1. При появлении дополнительного интервала: веса повторяющихся минимумов складываются, значения минимумов усредняются, определяется совокупная (по всему интервалу) невязка на минимумах, совокупные веса всех минимумов уменьшаются на единицу. Полученные веса и невязки служат для оценки достоверности решения. Для того чтобы решение считалось достоверным необходимо выполнение обязательного условия и любого из дополнительных. Обязательное условие: вес минимума больше 20. Учитывая логику вычисления веса минимума, обязательное условие гарантирует, что временной интервал превысит 120 секунд.

Дополнительные условия: 1) отношение весов первого и второго минимума больше 1,5 и, одновременно, отношение невязок второго и первого минимума больше 1,5; 2) отношение весов первого и второго минимума больше 2 и, одновременно, отношение невязок второго и первого минимума больше 1,25; 3) отношение весов первого и второго минимума больше 1,25 и, одновременно, отношение невязок второго и первого минимума больше 2; 4) интервал наблюдения больше 300 секунд и одновременно выполнено одно из условий: а) отношение весов первого и второго минимума больше 1,25 и отношение невязок второго и первого минимума больше 1,5; б) отношение весов первого и второго минимума больше 1,5 и, одновременно, отношение невязок второго и первого минимума больше 1,25.

**В четвертой главе** приведены результаты вычислительных и натуральных экспериментов.

В первом разделе главы приведены результаты исследования модели вторых разностей фазовых измерений. Исследованы характеристики вторых разностей, вычисленных на основе данных натурального эксперимента. Проведенный анализ невязки второй разности и ее линейной аппроксимации показал наличие периодических составляющих с периодом от 50 до 120 секунд, что далее используется в работе при исследовании разработанных алгоритмов (см. график автокорреляционной функции на рис. 3). Полученные результаты учтены при осуществлении предварительной обработки фазовых измерений, которая в противном случае оказалась бы существенно проще. Кроме того известные алгоритмы определения неоднозначностей оказались не применимы, т.к. исходят из предположения, что погрешности распределены по нормальному закону. При исследовании метода определения целочисленных неоднозначностей, была выполнена оценка возможного пространства перебора при определении неоднозначностей. Показано, что достаточным будет диапазон  $\pm 1$  для каждого из элементов вектора неоднозначностей  $\Delta a$ . Оценка получена математическим моделированием и подтверждена натурными экспериментами. Для оценки возможного влияния вычислительных погрешностей и немоделируемых компонент моделей получены величины обусловленностей основных вычислительных задач как числа обусловленности линейных операторов в системе (1). Полученные результаты (см. рис. 4) позволяют сделать вывод, что указанные составляющие не вносят существенной погрешности в результат.

Во втором и третьем разделах главы приведены результаты вычислительного эксперимента по исследованию характеристик разработанных алгоритмов оценки относительного положения и ориентации наземных объектов. Для проведения вычисли-

тельных и натуральных экспериментов разработана следующая методика:

1. Исследование алгоритма оценки относительного положения.
  - 1.1. Возможность успешной работы алгоритма в режиме определения неоднозначностей в зависимости от характеристик погрешностей, интервала накопления данных и количества спутников.
  - 1.2. Влияние погрешностей на точность оценки относительного положения в режиме отслеживания движения.
  - 1.3. Оценка точности получаемого решения.
  - 1.4. Оценка влияния ошибки определения неоднозначностей на точность решения;
  - 1.5. Оценка повышения эффективности при разметке антенного поля;
2. Исследование алгоритма оценки ориентации.
  - 2.1. Оценка точности стационарного расчета азимута.
  - 2.2. Исследование влияния отраженного сигнала на возможность правильного определения ориентации.
  - 2.3. Исследование времени получения решения в различных условиях.
  - 2.4. Оценка влияния ошибки определения неоднозначностей на точность решения.
  - 2.5. Оценка вероятности ложного срабатывания для критериев оценки достоверности решения.

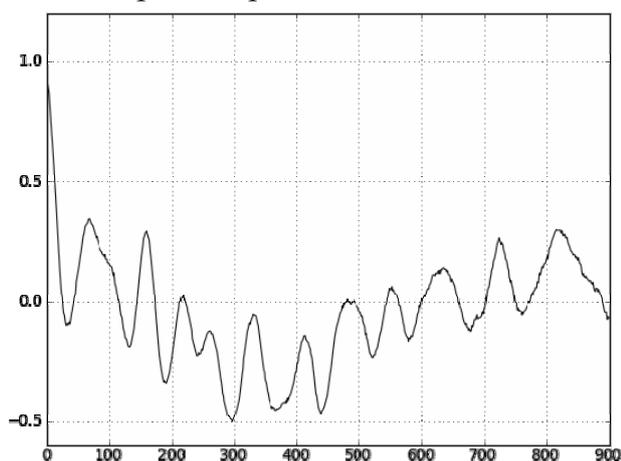


Рис. 3. График автокорреляционной функции невязки второй разности и ее линейной аппроксимации по 300 с интервалам. Ось абсцисс — время, секунд. Ось ординат — коэффициент корреляции.

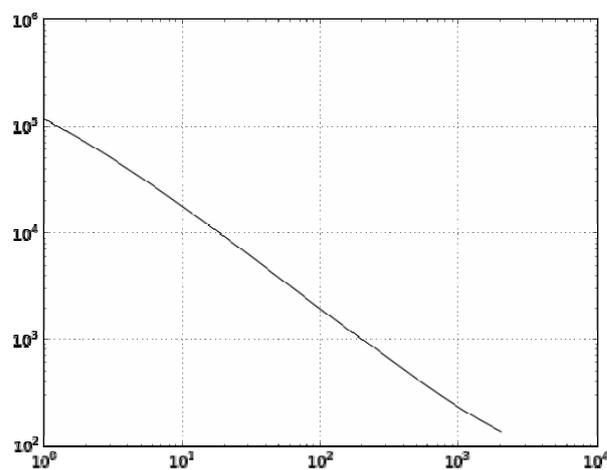


Рис. 4. Оценка зависимости числа обусловленности матрицы коэффициентов от времени при неизвестных неоднозначностях. Ось абсцисс — время, секунд. Ось ординат — число обусловленности. Логарифмическая шкала.

Основным критерием успешности работы алгоритма в режиме определения неоднозначностей является правильное определение вторых разностей неоднозначностей фазовых измерений. Работа алгоритма считается успешной, если определяемые и эталонные значения неоднозначностей полностью совпадают.

Исследование проведено следующим образом: на основе эфемерид моделировались характерные созвездия спутников и соответствующие измерения, после чего моделировались различные погрешности, как характерные для реальных измерений, так и превышающие их по интенсивности. Моделирование погрешностей выполнено по следующей формуле:

$$\Delta v_k = A_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \phi_k^1\right) + A_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_2} + \phi_k^2\right) + \eta(t) \quad (6)$$

В правой части уравнения (6) первой слагаемое — короткопериодическая составляющая, второе слагаемое — длиннопериодическая составляющая, третье слагаемое — случайная шумовая величина, распределенная по нормальному закону. При моделировании в качестве короткого периода использовалось значение 50 с, в качестве длинного — период 2 ч. Амплитуда шумовой величины устанавливалась на уровне 0,05 длины волны (1 см). Типичные значения амплитуды периодических составляющих — 0,1 длины волны (2 см) для обеих периодических составляющих.

Получены следующие результаты.

Характеристики погрешностей. Установлено, что при моделировании периодических составляющих погрешностей максимальными значениями амплитуды, при которых сохраняется работоспособность алгоритма, являются значения 0,2 длины волны (4 см).

Интервал накопления данных. На типичных амплитудах погрешностей верные значения неоднозначностей получаются через 4-5 минут. Для максимальных значений амплитуды погрешностей корректные результаты получаются за 13 минут. Учитывая, что в экспериментах использованы данные, записанные в достаточно хороших условиях, окончательно в работе предлагается использовать значение интервала в 15 минут, позволяющее получить достаточное количество данных для учета негативных факторов.

Число спутников. Для моделирования пропадания спутников составлена карта со звездами спутников. На карте отмечены области вероятного местоположения спутников на протяжении интервала исследования (15 минут). Выполнено моделирование экранирования части спутников препятствиями (исследованы случаи с 4, 5 и 6 спутниками). Установлено, что для 4 и 5 спутников алгоритм оказывается неработоспособным. Таким образом, для успешного определения неоднозначностей необходимо не менее 6 спутников при интервале накопления данных 15 минут.

Для оценки работы алгоритма в режиме отслеживания движения исследовано влияние погрешностей на точность оценки базовой линии. Результаты получены моделированием вторых разностей на основе уравнения (1). Установлено, что при переходе алгоритма в режим отслеживания движения, влияние погрешностей носит линейный характер в соответствии с формулой (1). Выполнена оценка точности получаемого решения при известных неоднозначностях, составившая 5 мм для горизонтальных координат и 1 см для вертикальных координат. Оценено влияние ошибки при определении неоднозначностей на точность оценки базовой линии. Теоретическая оценка ошибки сверху составляет от 1,5 длин волн для одной до 2,5 длин волн для трех ошибочно определенных неоднозначностей. Выполнена оценка сокращения времени разметки антенного поля при использовании фазовых измерений, показавшая, что использование разработанной программы позволяет сократить радиус окружности с 860 до 100 метров. Общее проходимое расстояние сокращается с 6600 до 770 м. Общее время работы сокращается в 8,5 раз.

В третьем разделе главы приведены результаты исследования характеристик разработанного алгоритма для решения задачи оценки ориентации объекта. Определена точность стационарного расчета азимута, составившая 0,7 градуса в худшем случае. Приведены результаты исследований суточного изменения абсолютной погрешности азимута. Исследования стационарного расчета ориентации в условиях отраженного сигнала показали, что отраженный сигнал снижает вероятность правильного расчета.

Выполнены исследования времени получения решения в различных условиях. В благоприятных условиях правильное решение определяется за 3-4 минуты. В неблагоприятных условиях правильное решение определяется за 11-15 минут. Оценено влияние ошибки при определении неоднозначностей на точность оценки ориентации (для базовой линии 1 м). Теоретическая оценка ошибки сверху составляет от 16 градусов для одной до 27 градусов для трех ошибочно определенных неоднозначностей. Приведены результаты оценки вероятности ошибки ложного срабатывания для одного из критериев оценки достоверности. Продемонстрировано, что данная вероятность является практически нулевой, т.е. вместо того, чтобы выдать пользователю неверный результат, алгоритм будет продолжать накапливать данные.

**В пятой главе** описан комплекс программ оценки относительного положения и ориентации наземных объектов. Комплекс состоит из программы оценки относительного положения и программы оценки ориентации. Для каждой из программ приведены ее функциональное назначение, аппаратные требования, средства разработки, руководство пользователя по настройке и использованию, структура и особенности программной реализации. Для программы оценки относительного положения также описано взаимодействие классов, а для программы оценки ориентации — архитектура аппаратной части.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Выполнен анализ математической модели фазовых измерений, их вторых разностей и методов их обработки. Исследование погрешностей в уравнении вторых разностей фазовых измерений сигналов СРНС позволило расширить известную модель фазовых измерений дополнительными периодическими составляющими. Применение модели позволяет значительно скомпенсировать периодические ошибки и получить более точные результаты. Прогнозируемое увеличение точности — до 2-3 см. Выполнена оценка матрицы коэффициентов, показавшая ее хорошую обусловленность на заданных интервалах накопления данных. Определены границы перебора неоднозначностей —  $\pm 1$  длина волны.

2. Разработан алгоритм для решения задачи высокоточной оценки относительного положения подвижных наземных объектов с помощью СРНС.

3. Определены условия корректной работы алгоритма для решения задачи оценки относительного положения при работе в режиме определения неоднозначностей по следующим параметрам: интервал накопления данных, количество спутников, характеристики периодических составляющих модели. На типичных значениях амплитуд периодических составляющих минимальным интервалом накопления является интервал в 5 минут. На максимальных значениях амплитуд периодических составляющих минимальным интервалом накопления является интервал в 13 минут. Максимальное допустимое значение амплитуды периодических составляющих составляет 4 см. Минимальным необходимым количеством спутников является 6. Влияние погрешностей на точность определения базовой линии в режиме отслеживания движения является линейным. Оценено среднеквадратичное отклонение решения, составившее 0,5 см для горизонтальных координат и 1 см для вертикальной координаты. Оценено влияние ошибки определения неоднозначности на точность решения (ошибка составляет не менее 13 см). Выполнена оценка сокращения времени разметки антенного поля, показавшая уменьшение временных затрат в 8,5 раз.

4. Разработан алгоритм для решения задачи оценки ориентации объекта с помощью СРНС.

5. Определена точность стационарного определения азимута для задачи оценки ориентации, составившая около 0,5 градуса. Определен минимальный временной ин-

тервал для решения задачи определения ориентации неподвижного объекта в неблагоприятных условиях — 11 минут. Оценено влияние ошибки определения неоднозначностей на точность решения. Выполнена оценка вероятности ложного срабатывания для критериев оценки достоверности решения, показавшая практическую невозможность таких ошибок.

6. Разработан комплекс программ для высокоточной оценки относительного положения и ориентации наземных объектов.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертационной работы**

1. Ашихмин А.В. Использование цифрового измерительного приемника АРГАМАК-ИМ для измерения напряженности поля в мобильных станциях радиомониторинга. / А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, Д.Е. Кочкин, Е.А. Чубов // «Специальная техника». — 2006. — № 3. — С. 35-44.

2. Бегишев М.Р. Автоматизированный мониторинг интенсивности электромагнитного поля. / М.Р. Бегишев, С.В. Двоглазова, В.А. Козьмин, Д.Е. Кочкин, С.И. Савельев. // «Специальная техника». — 2007. — № 2. — С. 34-39.

3. Кочкин Д.Е. Применение математической модели вторых разностей фазовых измерений GPS в задаче относительного местоопределения. / Д.Е. Кочкин // «Вестник Воронежского государственного технического университета». — 2009. — Т. 5, №6. — С. 90-93.

4. Кочкин Д.Е. Определение ориентации неподвижного объекта с помощью спутниковых радионавигационных систем. / Д.Е. Кочкин // «Вестник Воронежского государственного технического университета». — 2009. — Т. 5, № 8. — С. 101-103.

5. Артемов М.А. Использование сглаживания кодовых измерений сигналов СРНС типа NAVSTAR / М.А. Артемов, И.Б. Крыжко, Д.Е. Кочкин // Черноземный альманах научных исследований. Сер. Прикладная математика и информатика. — Воронеж, 2006. — Вып. 1(2). — С. 9-14.

6. Артемов М.А. Исследование производительности операций над матрицами в различных языках программирования / М.А. Артемов, Д.Е. Кочкин, И.Б. Крыжко // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «Системный анализ и информационные технологии». — Воронеж, 2007. — № 1. — С. 5-9.

7. Артемов М.А. Сокращение пространства перебора при решении задачи относительного местоопределения дифференциальными методами / М.А. Артемов, Д.Е. Кочкин, И.Б. Крыжко // Авиакосмические технологии "АКТ-2007": труды VIII Всероссийской с международным участием научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Воронеж, 12-14 сентября 2007 г.). — Воронеж, 2007. — С. 338-344.

8. Артемов М.А. Сравнение производительности оптимизированного кода современных компиляторов / М.А. Артемов, И.Б. Крыжко, Д.Е. Кочкин // Проблемы обеспечения устойчивого социально-экономического развития России в современных условиях. — Воронеж: ВФ ВЗФЭИ. — 2007. — С. 12-16.

9. Бегишев М.Р. Применение мобильной станции радиомониторинга «Аргумент-И» для службы санитарно-эпидемиологического контроля. / Бегишев М.Р., Козьмин В.А., Кочкин Д.Е. // Труды XI-й Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». — Воронеж, 2005, Т.2. — С. 1246-1252.

10. Кочкин Д.Е. Алгоритм определения неоднозначностей вторых разностей фазовых измерений GPS в задаче относительного местоопределения / Д.Е. Кочкин // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования. Материалы докладов IX Всероссийской научно-технической конференции (Тамбов, 27-28 апреля 2009 г.). Ч.1. — Тамбов: ТВВАИУРЭ (ВИ), 2009. — С. 243-253.

11. Кочкин Д.Е. Выбор языка программирования для реализации математических задач, использующих работу с матрицами. / Д.Е. Кочкин, М.А. Артемов, Н.А. Проскурякова // Из режима функционирования — в режим развития. Материалы региональной межвузовской научно-практической конференции (Воронеж, 23-26 апреля 2007 г.). — Воронеж: изд-во МГЭИ. — 2007. — С. 56-59.

12. Кочкин Д.Е. Инструментарий GPS Toolkit — системный подход к решению задач спутниковой навигации. / Д.Е. Кочкин, М.А. Артемов // Авиакосмические технологии «АКТ-2008». Тезисы IX Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых учёных, аспирантов и студентов. — Воронеж: ВГТУ. — 2008. — С. 84-85.

13. Кочкин Д.Е. Использование Lambda-метода для быстрого нахождения целочисленных неопределенностей / Д.Е. Кочкин, М.А. Артемов, И.Б. Крыжко // Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика 2007). Международная научно-техническая конференция и Российская научная школа молодых ученых и специалистов: материалы Международной конференции и Российской научной школы — М., 2007. — Ч. 2, Т. 2. — С. 55-59.

14. Кочкин Д.Е. Применение математической модели вторых разностей фазовых измерений в навигационных задачах радиомониторинга. / Д.Е. Кочкин // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. Сборник трудов Международной конференции (Воронеж, 22-24 июня 2009 г.). Ч.1. — Воронеж: ВГУ, 2009. — С. 266-270.

15. Кочкин Д.Е. Применение спутниковых навигационных систем для определения ориентации неподвижной платформы. / Д.Е. Кочкин // Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами (Инноватика-2008). Материалы Международной конференции и Российской научной школы. — М.: Энергоатомиздат, 2008. — Ч. 4, Т. 2. — С. 31-34.

16. Кочкин Д.Е. Распределенная диспетчерская система реального времени на базе трекера GLOBALSAT TR-102 / Д.Е. Кочкин, М.А. Артемов, И.Б. Крыжко // Современные проблемы механики и прикладной математики: сборник трудов международной школы-семинара, Воронеж, 17-19 сент. 2007 г. — Воронеж, 2007. — С. 172-177.

17. Кочкин Д.Е. Универсальная модель задач с фазовыми измерениями для системы ГЛОНАСС и GPS. // Кибернетика и высокие технологии XXI века. Труды IX международной научно-технической конференции. Т.2. — Воронеж: ВГУ. — 2008. — С. 747-751.

18. Крыжко И.Б. Инерциально-спутниковая навигационная система для подвижных наземных объектов / И.Б. Крыжко, М.А. Артемов, Д.Е. Кочкин // Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами (Инноватика-2008). Материалы Международной конференции и Российской научной школы. — М.: Энергоатомиздат, 2008. — Ч. 4, Т. 2. — С. 26-30.

19. Крыжко И.Б. Совместное использование фазовых и кодовых измерений сигналов СРНС типа NAVSTAR / И.Б. Крыжко, М.А. Артемов, Д.Е. Кочкин // Авиакосмические технологии "Акт -2006": труды седьмой международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов г. Воронеж, 13-15 сентября 2006. — Воронеж, 2006. — С. 556-562.

Работы [1]-[4] опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Подписано в печать 27.05.10. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 0,93.  
Тираж 100 экз. Заказ 731

Отпечатано с готового оригинала-макета  
в типографии Издательско-полиграфического центра  
Воронежского государственного университета.  
394000, Воронеж, ул. Пушкинская, 3.