

На правах рукописи



Щербинина Елизавета Альбертовна

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ
СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА ОСНОВЕ
МАЛОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК**

Специальность

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Цикин Игорь Анатольевич

Официальные оппоненты:

Ипатов Валерий Павлович

доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических систем ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Пшеничников Александр Викторович

кандидат технических наук, докторант кафедры радиосвязи Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации


Защита состоится 14 декабря 2017 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, учебный корпус 4, аудитория 305.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета www.spbstu.ru.

Автореферат разослан « » октября 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Коротков Александр Станиславович



Общая характеристика работы

Актуальность темы

Одной из наиболее динамично развивающихся областей применения современных методов обработки радиосигналов является прием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), используемых, в том числе, при решении задач пространственной ориентации навигационных объектов (НО). Наивысшую точность измерений при этом обеспечивают фазовые интерферометрические методы, применение которых требует наличия расположенного на НО приемного устройства с антенной решеткой (АР), осуществляющего прием и обработку сигналов, излучаемых навигационными космическими аппаратами (НКА), причем специфической особенностью этой задачи в случае, например, современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является применение бортовых малоэлементных (3...10 элементов) антенных решеток.

При разработке алгоритмов, основанных на интерферометрическом принципе, возникают две отдельные подзадачи – исключение неоднозначности фазовых измерений и определение ориентации в условиях, когда неоднозначность исключена. Существуют подходы, предполагающие раздельное [Фатеев, Cohen и др.], либо одновременное [Giorgi, Давыденко, Алешечкина и др.] решение указанных выше двух подзадач. При раздельном решении можно выделить методы, основанные на использовании статистически независимых результатов измерений разностей фаз на «основных» вектор-базах из всех, образованных парами антенных элементов (АЭ). В то же время остается открытым вопрос о целесообразности использования всех вектор-баз АР.

При совместном решении указанных выше двух подзадач используется алгоритм MC LAMBDA [Giorgi], особенностью которого является прием сигналов отдельно на каждом АЭ одноканальными малогабаритными навигационными приёмниками, имеющими свой отдельный опорный генератор и требующими синхронизации их совместной работы, что усложняет устройство обработки сигналов в целом.

Также одновременно решает обе подзадачи метод эталонных разностей фаз [Давыденко]. При необходимости реализации процесса непрерывного измерения пространственной ориентации непосредственно на НО, особенно в случае жестких ограничений, накладываемых на масса-габаритные показатели аппаратуры, перспективность методов пространственной ориентации следует рассматривать, в том числе, с учетом особенностей их реализации на современной программируемой элементной базе. С этой точки зрения метод эталонных разностей фаз обладает преимуществом, особенно важным при работе в реальном времени. Однако остается неясным соответствие и сравнительная эффективность метода эталонных разностей фаз и оптимального по критерию максимума правдоподобия.

Подкласс алгоритмов обработки сигналов в целях пространственной ориентации, не относящихся к интерферометрическим и основанных на измерениях координат вектор-баз («векторные измерения») в соответствующей системе координат («векторное согласование», или решение задачи в постановке Wahba's.), включает такие алгоритмы, как Markley's SVD [Markley], QUEST [Shuster] и др. Применение данных алгоритмов возможно при использовании нескольких, установленных в точках расположения АЭ, высокоточных приемников, позволяющих определить координаты АЭ в геоцентрической системе координат, а соответственно, и координаты вектор-баз. Данный подход характеризуется отсутствием проблемы фазовой неоднозначности, однако существенно увеличивает стоимость приемного оборудования и его масса-габаритные характеристики.

С другой стороны, асимптотически эффективными (при больших значениях отношения сигнал/шум), обеспечивающими минимальное значение среднеквадратического отклонения (СКО) получаемых оценок параметров пространственной ориентации от их истинных значений, являются оценки по методу максимума правдоподобия (МП). При общем подходе эти оценки должны быть получены на основе максимизации функции правдоподобия (ФП) многомерных выборок анализируемых процессов, наблюдаемых непосредственно на элементах АР при приеме сигналов от различных НКА [Перов]. Однако, существуют и иные подходы, основанные на построении ФП измеренных разностей фаз сигналов от различных НКА на различных парах АЭ [Перов, Степанов, Кошаев, Фатеев], результатов векторных измерений [Markley, Shuster] и т.п. Тем не менее, остается неясным различие в эффективности таких алгоритмов в сравнении с оптимальным по МП, предусматривающим указанный выше общий подход формирования ФП. В то же время, в случае общего подхода при рассмотрении «сложных гипотез», когда, кроме искомого параметра пространственной ориентации, в анализируемой выборке сигналов, принятых АР, присутствуют неизвестные «мешающие» параметры (прежде всего случайные начальные фазы сигналов, излученных НКА), для исключения этих параметров из ФП используется статистическое усреднение. Однако, представляет интерес применение в данном случае метода обобщенного критерия МП. К этому следует добавить, что в упомянутых работах в числе «мешающих» параметров не рассматриваются случайные амплитудные коэффициенты.

Также представляет интерес анализ зависимости точности оценок параметров пространственной ориентации от истинных значений этих параметров. При этом важным является рассмотрение различных реальных созвездий НКА и анализ возможного критерия выбора НКА из данного созвездия для пространственной ориентации.

Рассматриваемые интерферометрические алгоритмы пространственной ориентации по сигналам ГНСС требуют точного знания координат фазовых центров антенных элементов, что приводит к необходимости проведения калибровки антенной решетки. При этом на предварительном этапе пространственной ориентации может отсутствовать возможность использования как инерциальных датчиков, так и точно откалиброванной вспомогательной антенны. В случае ограниченного времени, отведенного на процедуру калибровки, также не представляется возможным реализовать размещение калибруемых АЭ на коротких базах. Таким образом, представляет интерес разработка процедуры калибровки антенной решетки, установленной на реальном НО, в отсутствие дополнительного оборудования.

Объектом исследования в работе являются алгоритмы обработки сигналов ГНСС при пространственной ориентации на основе малоэлементных антенных решеток

Предметом исследования является эффективность алгоритмов обработки сигналов ГНСС при пространственной ориентации на основе малоэлементных антенных решеток

Целью работы является повышение эффективности алгоритмов обработки сигналов ГНСС на базе малоэлементных антенных решеток при пространственной ориентации объектов

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

1. Разработка алгоритма оценки параметров пространственной ориентации по обобщенному критерию максимума правдоподобия на основе анализа многомерных выборок анализируемых процессов, наблюдаемых непосредственно на элементах АР при приеме сигналов от различных НКА

2. Исследование возможных путей построения алгоритмов, подоптимальных по отношению к алгоритму по обобщенному критерию максимума правдоподобия, обеспечивающих снижение требуемых вычислительных затрат при допустимых потерях точности.

3. Создание универсальной модели обработки сигналов ГНСС в соответствии с разработанными алгоритмами.

4. Исследование эффективности разработанных алгоритмов на основе сравнения по точности получаемых оценок углов ориентации и по вычислительным затратам при реализации на программируемой элементной базе

5. Разработка и оценка эффективности процедуры калибровки малоэлементной антенной решетки непосредственно на навигационном объекте по реальным сигналам ГНСС без использования дополнительного оборудования.

6. Проведение полунатурного моделирования разработанных алгоритмов на основе обработки реальных записей сигналов ГНСС.

В диссертации разработан и детально исследован алгоритм оценки параметров пространственной ориентации, оптимальный по обобщенному критерию максимума правдоподобия, на основе анализа многомерных выборок анализируемых процессов, наблюдаемых непосредственно на элементах АР при приеме сигналов от различных НКА. Основу алгоритма составляет максимизация полученной целевой функции с использованием эталонных разностей фаз. Представлены возможные пути построения подоптимальных, по сравнению с оптимальным, алгоритмов. С целью исследования сравнительной эффективности разработанных алгоритмов по точности получаемых оценок углов ориентации и по вычислительным затратам при реализации на программируемой элементной базе была создана универсальная модель обработки сигналов ГНСС в среде Матлаб.

В связи с тем, что используемые методы пространственной ориентации требуют точного знания координат фазовых центров антенных элементов, была разработана двухэтапная процедура калибровки малоэлементной антенной решетки непосредственно на навигационном объекте по реальным сигналам ГНСС без использования дополнительного оборудования. Для проверки адекватности моделирования алгоритмов пространственной ориентации и процедуры калибровки было проведено полунатурное моделирование с использованием реальных записей сигналов ГНСС GPS.

Научная новизна работы

1. Предложен алгоритм, оптимальный по обобщенному критерию максимума правдоподобия, предполагающий анализ многомерных выборок процессов непосредственно на элементах антенной решетки, и проведено исследование эффективности такого алгоритма на основе сравнения по точности получаемых оценок углов ориентации в широком диапазоне отношений сигнал/шум, при различных значениях истинных параметров пространственной ориентации и разном количестве используемых НКА из рабочего созвездия.

2. Показано, что в пределе при больших значениях отношений сигнал/шум целевая функция оптимального алгоритма, построенного на основе анализа многомерных выборок процессов непосредственно на антенных элементах, сводится к целевой функции, сформированной на основе метода максимума пространственной мощности в задачах пеленгации.

3. Доказано, что эмпирическая целевая функция метода эталонных разностей фаз полностью совпадает с целевой функцией, полученной из функции правдоподобия разностей фаз сигналов, принятых парами антенных элементов, в предположении равенства дисперсий этих разностей. Алгоритм, основанный на максимизации такой целевой функции, уступает по эффективности всем остальным разработанным алгоритмам в ситуации как низких, так и высоких ионосферных сцинтилляций.

4. Показано, что исключение из функции правдоподобия случайных начальных фаз сигналов, излученных всеми используемыми НКА, по обобщенному методу максимума правдоподобия, используя сигналы, принятые лишь на одном из АЭ, приводит к формированию целевой функции, включающей измерения лишь на «основных» базах.

5. Предложена двухэтапная процедура калибровки элементов антенной решетки, использующая значение максимума целевой функции R_{Σ} , нормированное к величине ее максимума при отсутствии шума, как показатель качества проведенной калибровки. При этом критерием завершения каждого из этапов является превышение показателем качества соответствующего порогового значения.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм, оптимальный по обобщенному критерию максимума правдоподобия, предполагающий анализ многомерных выборок процессов непосредственно на элементах антенной решетки, имеет преимущества как по точности получаемых оценок, так и по вероятности аномальных ошибок по сравнению с подоптимальными алгоритмами, полученными на основе функции правдоподобия разностей фаз сигналов, принятых парами антенных элементов от различных НКА.

2. Целевая функция оптимального алгоритма, формируемая на основе анализа многомерных выборок процессов непосредственно на антенных элементах, в пределе при больших значениях отношений сигнал/шум совпадает с целевой функцией, сформированной на основе метода максимума пространственной мощности в задачах пеленгации.

3. При малых различиях амплитудных коэффициентов сигналов от НКА (случай низкого уровня ионосферных сцинтилляций) точности оценок углов ориентации для оптимального алгоритма и алгоритма, построенного на основе решения задач пеленгации, совпадают, причем в диапазоне малых отношений сигнал/шум они оказываются выше по сравнению с точностями оценок, обеспечиваемых подоптимальными алгоритмами, получаемыми на основе функции правдоподобия разностей фаз сигналов, принятых парами антенных элементов.

4. В случае, когда в созвездии присутствуют НКА, для которых имеют место как низкие (например, в области $q = -40$ дБ), так и высокие (например, в области $q = -10$ дБ) отношения сигнал/шум, подоптимальный алгоритм, построенный на основе решения задач пеленгации, уступает по точности всем разработанным алгоритмам на величину СКО 0.1° , кроме алгоритма, полученного на основе функции правдоподобия разностей фаз сигналов в предположении равенства дисперсий этих разностей фаз.

5. Предложенная в диссертационной работе двухэтапная процедура калибровки может быть реализована при неизвестных параметрах пространственной ориентации непосредственно на навигационном объекте по сигналам ГНСС без использования дополнительного оборудования и позволяет существенно повысить точность получаемых оценок $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$.

Практическая ценность новых научных результатов

1. Результаты проведенного анализа предложенных алгоритмов обработки сигналов ГНСС позволяют произвести обоснованный выбор метода обработки в зависимости от величины отношения сигнал/шум и особенностей используемого созвездия НКА.

2. Разработаны рекомендации по определению количества НКА, начиная с которого дальнейшее его увеличение при данном отношении сигнал/шум не приводит к существенному повышению точности оценок.

3. Калибровка элементов антенной решетки при неизвестных параметрах пространственной ориентации может быть реализована по сигналам ГНСС непосредственно на навигационном объекте без использования дополнительного оборудования путем применения разработанной двухэтапной процедуры.

4. Показана возможность сокращения времени, затрачиваемого на моделирование процедуры калибровки при больших отношениях сигнал/шум ($q \geq -15$ дБ), путем

использования в качестве исходных данных случайных значений измеренных разностей фаз при гауссовой аппроксимации закона их распределения.

Использование результатов диссертации

Результаты диссертационной работы используются в ООО «СТЦ» при настройке модуля высокоточного определения ориентации (МВОО), разработанного в рамках выполнения СЧ ОКР "Москит-У-СТЦ", а также использованы при выполнении НИР №143422402 «Разработка и реализация методов навигации подвижных объектов и мониторинга радиоизлучений на основе совершенствования алгоритмов цифровой обработки сигналов» (2014г.), НИР №143422501 «Разработка и реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов для систем радиоконтроля» (2015г.), НИР №143427504 «Исследование характеристик сигналов глобальных спутниковых навигационных систем» (2016-2017г.г.), проводимых СПбГПУ совместно с ООО «СТЦ».

Апробация работы

Материалы диссертационного исследования прошли апробацию на следующих конференциях:

1. 19-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2017», РНТОРЭС им. А.С. Попова, Москва, март 2017.
2. 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Vienna, Austria, June 27-29, 2016.
3. 16th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems (NEW2AN 2016). St.Petersburg, September 26 - 28, 2016.
4. 18-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2016», РНТОРЭС им. А.С. Попова, Москва, март 2016.
5. XLI Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, 2012.

Публикации

По теме диссертационного исследования опубликовано 11 работ, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых отечественных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 – в сборниках материалов международных конференций, входящих в перечень Scopus, 4 – в сборниках материалов отечественных конференций, получен 1 патент на изобретение. Основные результаты в диссертационной работе получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 147 страниц, 91 рисунок, 7 таблиц, список используемой литературы из 83 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении кратко обоснована актуальность работы, приведены сведения о важности практического решения поставленных задач, изложена структура диссертационной работы.

В первом разделе работы проведен аналитический обзор литературы по проблеме обработки сигналов ГНСС при пространственной ориентации на основе малоэлементных антенных решеток. Особое внимание уделяется алгоритмам, оптимальным по критерию максимума правдоподобия. Рассмотрена проблема калибровки антенных решеток непосредственно на навигационном объекте по сигналам ГНСС. Сформулированы цель и задачи работы.

Второй раздел посвящен разработке алгоритма, оптимального по обобщенному критерию максимума правдоподобия, предполагающего анализ многомерных выборок процессов непосредственно на M элементах антенной решетки. Реализация $x_m(t)$ анализируемого процесса на m -ом ($m = 1, \dots, M$) антенном элементе $A\mathcal{E}_m$ антенной решетки, установленной на НО, при истинных углах $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ ориентации НО представляет сумму сигналов от L НКА и аддитивного шума:

$$x_m(t) = \sum_{l=1}^L \mu^{(l)} y_{\psi}^{(l)}(t - \delta t_m^{(l)}(\boldsymbol{\theta}_0)) + n_m(t), \text{ где}$$

$y_{\psi}^{(l)}(t - \delta t_m^{(l)}(\boldsymbol{\theta}_0)) = A_0^{(l)}(t - \delta t_m^{(l)}(\boldsymbol{\theta}_0)) \cos(\omega_0 t + \varphi_0^{(l)}(t - \delta t_m^{(l)}(\boldsymbol{\theta}_0)) + \psi^{(l)} + \delta \varphi_m^{(l)}(\boldsymbol{\theta}_0))$ – сигнал от l -го НКА, $\mu^{(l)}$ – коэффициент, характеризующий изменение амплитуды сигнала l -го НКА при распространении в канале, $\boldsymbol{\theta}_0 = (\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ – вектор истинных значений углов ориентации, $\delta t_m^{(l)}(\boldsymbol{\theta}_0)$ – время распространения сигнала от l -го НКА до $A\mathcal{E}_m$, зависящее от положения $A\mathcal{E}_m$ в пространстве, $n_m(t)$ – реализация шума на $A\mathcal{E}_m$, $\delta \varphi_m^{(l)}(\boldsymbol{\theta}_0) = -\omega_0 \delta t_m^{(l)}(\boldsymbol{\theta}_0)$ – сдвиг фазы излученного сигнала, определяемый временем распространения $\delta t_m^{(l)}(\boldsymbol{\theta}_0)$, $\psi^{(l)}$ – случайная начальная фаза.

Рассматриваемая задача оценки параметров пространственной ориентации относится к случаю «сложных гипотез». Считая неизвестным распределение «мешающих» параметров, используется обобщенный критерий максимума правдоподобия. Полученный алгоритм для случая гауссового аддитивного шума сводится к максимизации целевой функции вида:

$$B(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K W_k^{(l)} \cos(\Delta \hat{\Phi}_k^{(l)} - \Delta \psi_k^{(l)}(\boldsymbol{\theta})) \quad (1)$$

по вектору искомых параметров, которая приводит к значениям $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$ оценок по максимуму правдоподобия параметров пространственной ориентации. Здесь K – число всех вектор-баз АР; $W_k^{(l)} = V_i^{(l)} \cdot V_j^{(l)}$ – произведения значений огибающих результатов оптимальной корреляционной обработки сигналов от l -го НКА, принятых на i -ом и j -ом антенных элементах, образующих k -ую вектор-базу, в момент окончания полезных сигналов (рис. 1). При этом $\Delta \hat{\Phi}_k^{(l)} = \hat{\Phi}_i^{(l)} - \hat{\Phi}_j^{(l)}$ – разности соответствующих фаз указанных результатов оптимальной корреляционной обработки; $\Delta \psi_k^{(l)}(\boldsymbol{\theta}) = \omega_0 (\delta t_i^{(l)}(\boldsymbol{\theta}) - \delta t_j^{(l)}(\boldsymbol{\theta}))$. На рис.1 представлена схема, иллюстрирующая процедуру вычисления составляющих выражения (1) при реализации двух способов производимых вычислений: измерения тригонометрических функций (первый способ) и непосредственно самих значений (второй

способ) рассматриваемых фаз принятых сигналов, где $F_m(n\Delta t)$, $F_o^{(l)}(n\Delta t)$ – комплексные огибающие (в дискретной форме) принятой реализации $x_m(t)$ и сигнала $y_\psi^{(l)}(t)$ с нулевым значением начальной фазы..

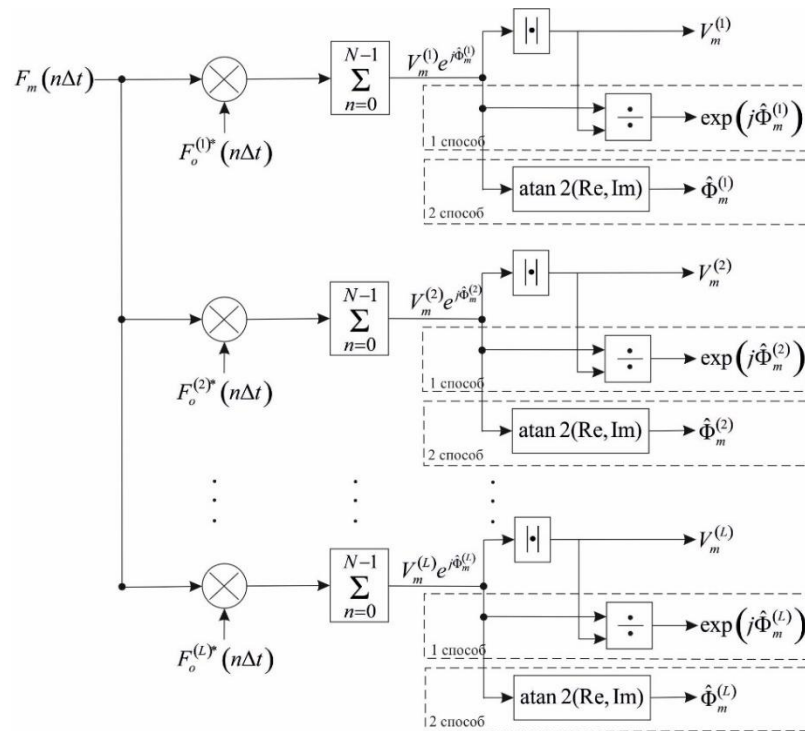


Рис. 1

Максимизация $B(\theta)$ по вектору неизвестных параметров реализуется с использованием замены непрерывного множества значений $\Delta\psi_k^{(l)}(\theta)$ дискретным набором эталонных разностей фаз (ЭРФ) сигналов, поступающих на различные элементы АР. Значения ЭРФ могут быть рассчитаны заранее или в процессе измерений углов α, β, γ для конкретного местоположения НКА и любой возможной ориентации навигационного объекта. В конечном счете, путем подстановки данных наборов в результирующую функцию $B(\theta)$ может быть построена зависимость значений этой функции от углов α, β, γ . Позиции максимальных значений этой функции определяют оценки $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$ параметров пространственной ориентации. На рис. 2 в качестве примера приведена зависимость нормированных значений целевой функции (1) от углов ориентации для различного числа НКА при истинных значениях параметров пространственной ориентации $\alpha_0 = 30^\circ, \beta_0 = 0^\circ, \gamma_0 = 0^\circ$ и одинаковых для всех НКА отношениях сигнал/шум $q = -15\text{дБ}$.

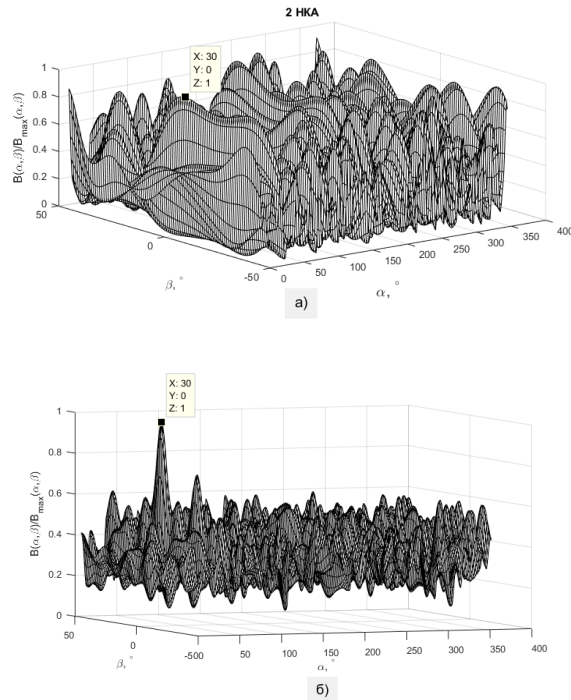


Рис. 2

Исследование эффективности разработанного алгоритма проводилось для различных созвездий НКА и местоположения НО на Земле при использовании трехэлементной АР, типичной для БПЛА, в широком диапазоне отношений сигнал/шум и различных истинных значениях параметров пространственной ориентации. Соответствующие результаты иллюстрируются зависимостями, приведенными ниже (раздел 3), совместно с результатами, полученными для различных подоптимальных алгоритмов.

В третьем разделе подробно рассмотрены различные пути упрощения оптимального алгоритма, направленные на сокращение вычислительных затрат. Представлены возможные варианты подоптимальных алгоритмов на основе:

- предположения равенства уровней сигналов от различных НКА при формировании функции правдоподобия;
- получения оценок начальных фаз сигналов, излученных различными НКА, на основании рассмотрения функции правдоподобия анализируемой выборки принимаемых сигналов лишь на одном из антенных элементов;
- построения функции правдоподобия непосредственно измеренных разностей фаз сигналов, принятых парами антенных элементов.

В основу подоптимального алгоритма №1 положена максимизация целевой функции, полученной в предположении $\mu^{(1)} = \mu^{(2)} \dots = \mu^{(L)} = \mu$:

$$\tilde{B}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{l=1}^L \left| \sum_{m=1}^M \left(V_m^{(l)} \right)^2 + \sum_{k=1}^K W_k^{(l)} \cos \left(\Delta \hat{\Phi}_k^{(l)} - \Delta \psi_k^{(l)}(\boldsymbol{\theta}) \right) \right|, \quad (2)$$

где $V_m^{(l)}$ – максимальное значение огибающей результата оптимальной корреляционной обработки сигнала l -го НКА на $AЭ_m$.

Подоптимальный алгоритм №2 основан, как и алгоритм №1, на предположении равенства уровней сигналов от различных НКА и, в дополнение к этому, использует указанный выше метод исключения случайных начальных фаз по сигналу лишь на одном из антенных элементов. Соответствующая целевая функция имеет вид:

$$\tilde{D}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=2}^M V_m^{(l)} \cos(\Delta\hat{\Phi}_{1m}^{(l)} - \Delta\psi_{1m}^{(l)}(\boldsymbol{\theta})). \quad (3)$$

Подоптимальные алгоритмы №3 и №4 разработаны на основе рассмотрения функции правдоподобия непосредственно измеренных разностей фаз сигналов от каждого НКА, принятых парами антенных элементов. В случае L НКА совместную функцию правдоподобия можно записать в виде:

$$W^{((M-1)L)}(\Delta\hat{\Phi}^{(1)}, \dots, \Delta\hat{\Phi}^{(L)} / \Delta\Phi^{(1)}, \dots, \Delta\Phi^{(L)}) = \frac{1}{(2\pi)^{(M-1)L/2}} \prod_{l=1}^L \left[\frac{1}{(\sigma_{\Delta\Phi}^{(l)})^{M-1}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\Delta\hat{\Phi}^{(l)} - \Delta\Phi^{(l)})^T (\mathbf{R}_{\sigma}^{(l)})^{-1} (\Delta\hat{\Phi}^{(l)} - \Delta\Phi^{(l)})\right) \right], \quad (4)$$

где $\Delta\hat{\Phi}^{(l)} = (\Delta\hat{\Phi}_{12}^{(l)}, \dots, \Delta\hat{\Phi}_{1M}^{(l)})^T$ – вектор-столбец измеренных разностей фаз сигналов, $\Delta\Phi^{(l)} = (\Delta\Phi_{12}^{(l)}, \dots, \Delta\Phi_{1M}^{(l)})^T$ – вектор-столбец математических ожиданий измеренных разностей фаз, $\mathbf{R}_{\sigma}^{(l)}$ – диагональная ковариационная матрица с определителем $|\mathbf{R}_{\sigma}^{(l)}| = (\sigma_{\Delta\Phi}^{(l)})^{2(M-1)}$.

Определение оценок параметров α, β, γ может осуществляться на основе поиска максимума функции $W^{((M-1)L)}(\Delta\hat{\Phi}^{(1)}, \dots, \Delta\hat{\Phi}^{(L)} / \Delta\Phi^{(1)}, \dots, \Delta\Phi^{(L)})$ из (4) перебором значений $\Delta\Phi_{1m}^{(l)}$ путем подстановки соответствующих значений эталонных разностей фаз (подоптимальный алгоритм №3). Полагая дисперсии разностей фаз $(\sigma_{\Delta\Phi}^{(l)})^2$ сигналов, принятых парами антенных элементов при приеме сигналов от различных НКА, одинаковыми и переходя к логарифмической функции, выражение (4) сводится к виду (подоптимальный алгоритм №4):

$$L_W^{((M-1)L)}(\Delta\hat{\Phi}^{(1)}, \dots, \Delta\hat{\Phi}^{(L)} / \Delta\Phi^{(1)}, \dots, \Delta\Phi^{(L)}) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=2}^M (\Delta\hat{\Phi}_{1m}^{(l)} - \Delta\Phi_{1m}^{(l)})^2. \quad (5)$$

Обратим внимание, что вид функции $L_W^{((M-1)L)}(\Delta\hat{\Phi}^{(1)}, \dots, \Delta\hat{\Phi}^{(L)} / \Delta\Phi^{(1)}, \dots, \Delta\Phi^{(L)})$ в (5) повторяет целевую функцию, соответствующую методу эталонных разностей фаз.

В основу подоптимального алгоритма №5 положена максимизация функции $R_{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})$, сформированной на основе метода максимума пространственной мощности в задачах пеленгации:

$$R_{\Sigma}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{l=1}^L R_l, \quad R_l = \sum_{k=1}^K \cos(\Delta\hat{\Phi}_k^{(l)} - \Delta\theta_k^{(l)}), \quad (6)$$

где R_l - функция, соответствующая l -му НКА. Максимизация $R_{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})$ может осуществляться перебором значений $\Delta\theta_k^{(l)}$ путем подстановки, как и при использовании рассмотренных выше алгоритмов, соответствующих значений эталонных разностей фаз.

Заметим, что при больших значениях отношения сигнал/шум, полагая малыми отличия значений случайных величин $V_m^{(l)}$ для различных m , когда $V_m^{(l)} = V^{(l)}$, функцию $B(\boldsymbol{\theta})$ в (1) можно привести к виду $\sum_{l=1}^L (V^{(l)})^2 R_l$. Более того, в этих же условиях (при больших значениях отношения сигнал/шум) в предположении равенства амплитудных

коэффициентов $\mu^{(l)}$ функция $B(\theta)$ приобретает вид $\sum_{l=1}^L R_l$, т.е. совпадает с целевой функцией R_Σ (6), полученной на основе решения задачи пеленгации.

Исследование эффективности разработанных алгоритмов проводилось на основе анализа как «нормальных», так и «аномальных» ошибок пространственной ориентации.

Анализ «нормальных» ошибок проводился прежде всего в предположении равенства амплитудных коэффициентов ($\mu^{(l)}=1$). На рис. 3 в качестве примера представлены зависимости СКО оценок курсового угла от отношения сигнал/шум для 9-ти из 12-ти НКА рабочего созвездия, наблюдаемого в г. Санкт-Петербург, при истинных значениях параметров пространственной ориентации $\alpha_0 = 30^\circ, \beta_0 = 0^\circ, \gamma_0 = 0^\circ$.

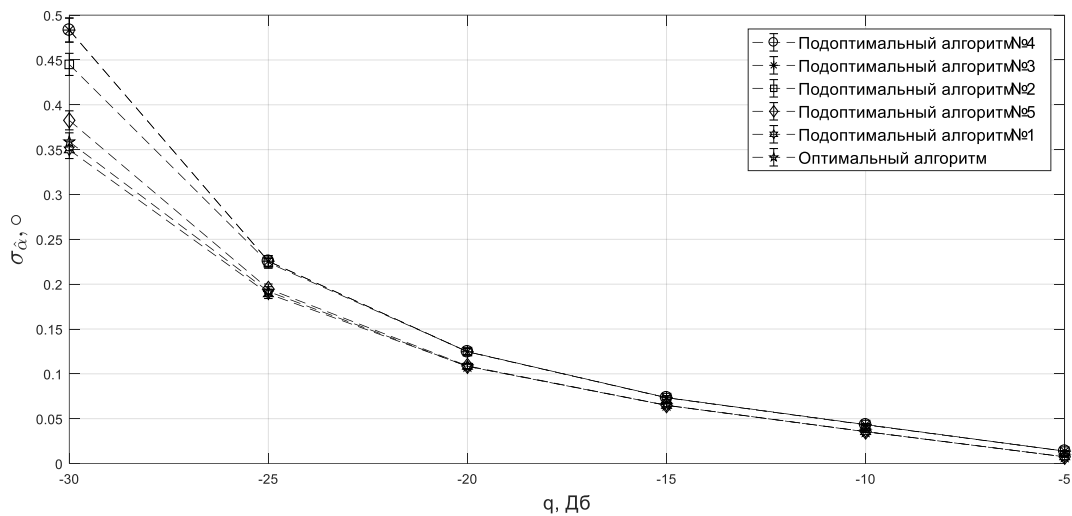


Рис.3

Анализ полученных зависимостей показал, что для подоптимальных алгоритмов, использующих статистически независимые результаты измерений лишь на «основных» базах (алгоритмы №2,3,4), СКО оценок курсового угла в диапазоне малых отношений сигнал/шум ($q = -25 \dots -30$ дБ) несколько выше (на величину $0.1^\circ - 0.2^\circ$) по сравнению с СКО тех же оценок, полученных при оптимальном алгоритме. При этом результаты, соответствующие подоптимальным алгоритмам №3 и №4, полностью совпадают, что объясняется их различием только в чувствительности к уровням принятых сигналов. Результаты, соответствующие оптимальному и подоптимальному №1 алгоритмам совпадают в пределах доверительного интервала. В тоже время СКО оценок, полученных при использовании подоптимального алгоритма №5, находятся между СКО оценок, полученных группой алгоритмов, использующих лишь только измерения на «основных базах», и СКО оценок, соответствующих оптимальному и подоптимальному №1 алгоритмам.

Подобные же выводы оказываются справедливыми и для СКО оценок тангажа и крена с тем лишь отличием, что потеря точности подоптимальных алгоритмов в сравнении с оптимальным оказывается еще ниже ($0.05^\circ - 0.1^\circ$).

Сравнение точности рассматриваемых алгоритмов проводилось также на основе использования реальных значений $\mu^{(l)}$ применительно к двум созвездиям, наблюдаемым в городах Санкт-Петербург и Бразилиа, характеризующимся низким уровнем ионосферных сцинтилляций, когда различия в амплитудных коэффициентах определяются, в основном, различием расстояний между НКА и НО. При этом точность пространственной ориентации

зависит в большей степени от количества используемых баз AP, чем от наличия взвешивания, влияющего на точность оценок только при малых отношениях сигнал/шум.

В то же время возможны ситуации, когда в созвездии присутствуют НКА как с низким, так и с высоким отношением сигнал/шум. Тогда вывод в пользу тех или иных алгоритмов может измениться. С целью анализа подобной ситуации при моделировании амплитудные коэффициенты задавались также со случайным набором различных значений $\mu^{(l)}$ с фиксированной и произвольной суммарной энергией принимаемых сигналов. На рис. 4 в качестве примера приведены зависимости СКО оценок курсового угла от отношения сигнал/шум для наборов амплитудных коэффициентов с фиксированной суммарной энергией для всех исследуемых алгоритмов. По оси абсцисс отложено значение отношения сигнал/шум для НКА с амплитудным коэффициентом, равным 1.

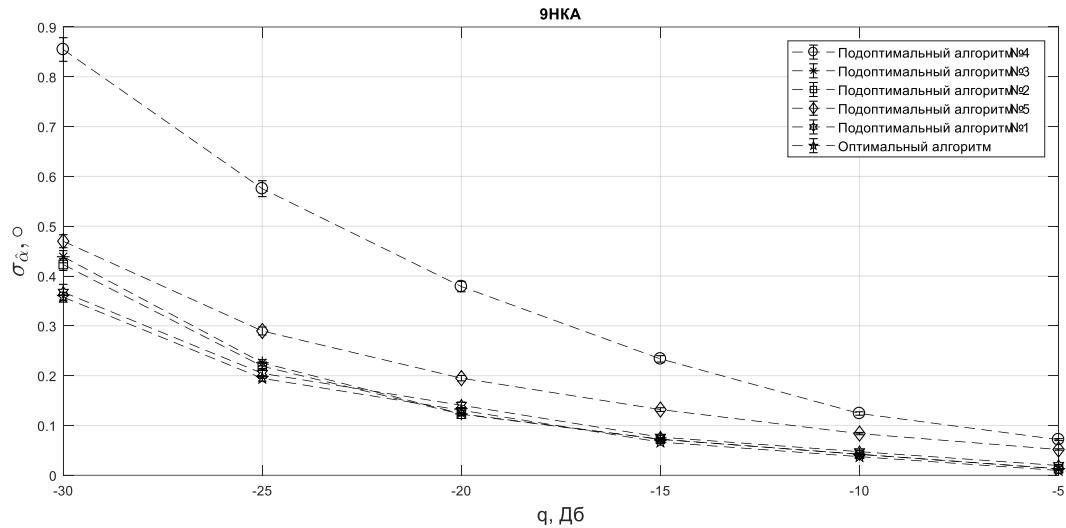


Рис. 4

Анализ полученных зависимостей показывает, что во всем диапазоне отношений сигнал/шум как в случае фиксированной, так и в случае произвольной энергии существенно хуже результаты получились при использовании подоптимального алгоритма №4. В диапазоне малых отношений сигнал/шум ($q = -30 \dots -25$ дБ) в случае произвольной энергии характер различий между остальными алгоритмами сохраняется, однако при $q \geq -25$ как в случае фиксированной, так и в случае произвольной энергии подоптимальный алгоритм №5 показывает СКО оценок углов ориентации выше даже по сравнению с подоптимальными алгоритмами №2 и №3, использующими результаты измерений только по «основным базам». Таким образом, в ситуации сильных отличий в значениях отношений сигнал/шум разных НКА наличие взвешивания (коэффициенты $V_m^{(l)}$, $W_k^{(l)}$ или $(\sigma_{\Delta\Phi}^{(l)})^2$) в исследуемом алгоритме играет важную роль в повышении точности пространственной ориентации.

В процессе моделирования «аномальная» ошибка фиксировалась в случае отличия полученной оценки хотя бы одного из параметров пространственной ориентации от его истинного значения более, чем на величину $\Delta_{аном} = 2^\circ$. На рис. 5 в качестве примера приведены зависимости вероятности аномальных ошибок от отношения сигнал/шум при $L=2$ и $L=7$ НКА из созвездия, наблюдаемого в г. Санкт-Петербург, при истинных значениях параметров пространственной ориентации $\alpha_0 = 30^\circ, \beta_0 = 0^\circ, \gamma_0 = 0^\circ$.

Анализ полученных результатов привел к тем же выводам о преимуществах или недостатках исследуемых алгоритмов, что и полученные при анализе в области нормальных ошибок при использовании реальных значений амплитудных коэффициентов.

Четвертый раздел посвящен решению проблемы калибровки антенной решетки непосредственно на навигационном объекте по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем в условиях отсутствия дополнительного оборудования (инерциальные датчики, точно откалиброванная вспомогательная антенна, опорно-поворотное устройство и т.д.). Величины сдвигов фазовых центров АЭ (СФЦ) относительно координат $x_{AЭ_m}, y_{AЭ_m}, z_{AЭ_m}$ АЭ (геометрических центров) задаются значениями смещений $\Delta x_{AЭ_m}, \Delta y_{AЭ_m}, \Delta z_{AЭ_m}$ координат АЭ в связанной с объектом СК XYZ в соответствии с формулой $\rho = \sqrt{(\Delta x_{AЭ_m})^2 + (\Delta y_{AЭ_m})^2 + (\Delta z_{AЭ_m})^2}$. В работе были получены зависимости

$\sigma_{\hat{\alpha}}, \sigma_{\hat{\beta}}, \sigma_{\hat{\gamma}}$ СКО оценок параметров пространственной ориентации от различных значений ρ . Диапазон рассматриваемых значений ρ выбирался в соответствии с типом используемых АЭ диаметром порядка 5 см и высотой не более 1 см. На рис. 6 в качестве примера приведены значения СКО курсового угла при $q = -15$ дБ в области «нормальных» ошибок для 3-элементной АР. Полученные в работе зависимости иллюстрируют резкое возрастание СКО курсового угла, начиная со значений $\rho = 8 \dots 12$ мм. При большом значении отношения сигнал/шум $q = -15$ дБ значения СКО курсового угла при $\rho = 10$ мм возрастают в 2 раза в случае плоской и в 3 раза в случае трехмерной модели СФЦ. В тех же условиях СКО тангажа увеличивается на 30% в случае плоской и на 50% в случае трехмерной модели СФЦ. При этом в реальных условиях значения ρ могут достигать нескольких сантиметров, что свидетельствует о необходимости проведения калибровки.

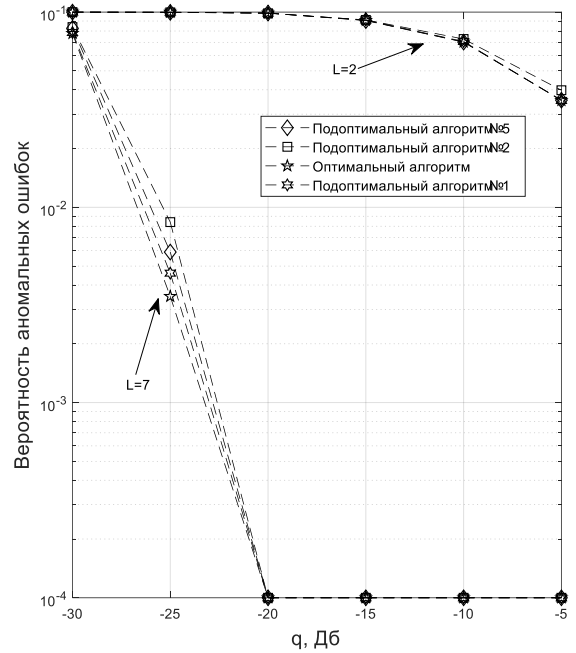


Рис.5

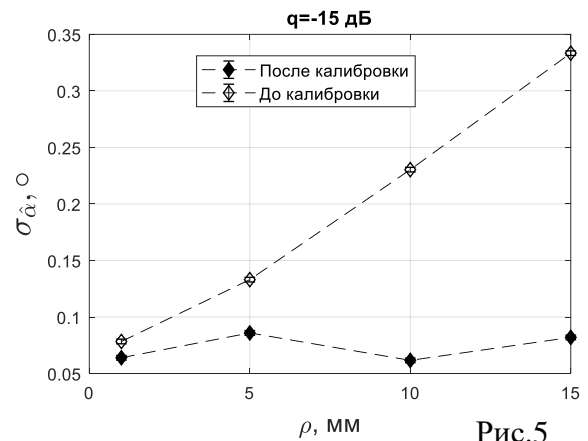


Рис.6

Проведенный в работе анализ вероятностей аномальных ошибок также свидетельствует о необходимости проведения калибровки.

Определение положений фазовых центров АЭ может быть произведено на основе использования максимизации описанной выше целевой функции $R_{\Sigma}(\theta)$. Действительно, заметим, что $R_{\Sigma}(\theta)$ является также функцией координат $x_{AЭ_m}, y_{AЭ_m}, z_{AЭ_m}$ антенных элементов ($m = 1, \dots, M$), перебором значений которых можно получить зависимость значений R_{Σ} не только от α, β, γ , но и от различных значений координат АЭ. При этом положение максимума R_{Σ} будет соответствовать не только значениям $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$ оценок углов ориентации, но и значениям оценок $\hat{x}_{AЭ_m}, \hat{y}_{AЭ_m}, \hat{z}_{AЭ_m}$ координат фазовых центров АЭ. Определение последних и представляет собой процедуру калибровки.

При переборе различных значений ЭРФ, рассчитываемых для разных комбинаций углов и разных координат АЭ, максимизация функции $R_{\Sigma}(\theta)$ может занять длительное время, недопустимое для процесса калибровки. Однако, если бы оценки параметров пространственной ориентации были известны, длительность процесса калибровки можно было бы значительно сократить. Поэтому целесообразно до проведения калибровки найти предварительные, возможно грубые, оценки $\hat{\alpha}_{z.o.}, \hat{\beta}_{z.o.}, \hat{\gamma}_{z.o.}$ углов, полученные в предположении, что координаты фазовых и геометрических центров АЭ совпадают. Таким образом, процедура калибровки может осуществляться в два этапа. Первый этап заключается в получении грубых оценок углов ориентации для координат АЭ, совпадающих с их геометрическими центрами, а второй этап – в получении оценок координат фазовых центров АЭ с учетом результатов первого этапа.

Для оценки эффективности рассматриваемой процедуры калибровки было проведено ее моделирование для случая использования 3-элементной АР при заданном истинном положении НО в пространстве $\alpha_0 = 30^\circ, \beta_0 = 0^\circ, \gamma_0 = 0^\circ$ при $q = -15$ дБ и $L = 9$. На рис. 6 приведены значения СКО курсового угла, полученные с использованием оцененных, с помощью рассмотренной процедуры калибровки, координат фазовых центров. Данные зависимости показывают, насколько эффективной оказывается рассмотренная процедура калибровки. Так, даже при $\rho = 15$ мм СКО курсового угла после проведения калибровки уменьшается в 3 раза. Также результаты моделирования показали, что после проведенной калибровки вероятность аномальных ошибок для всех значений ρ в рассмотренных условиях не превышает 10^{-4} , в то время как без калибровки указанная вероятность достигала бы значения 10^{-3} .

В пятом разделе для проверки адекватности моделирования алгоритмов пространственной ориентации и процедуры калибровки было проведено полунатурное моделирование с использованием реальных записей сигналов ГНСС GPS. Для проверки получаемых оценок при использовании разных алгоритмов обработки сигналов необходимо знание истинных параметров пространственной ориентации, что потребовало применения дополнительного оборудования. Кроме того, при записи сигналов ГНСС с использованием реального радиоприемного устройства необходимо было устранить фазовые искажения, вносимые высокочастотными аналоговыми трактами данного приемного устройства, путем предварительного измерения паразитных сдвигов фаз в каналах таких трактов.

Полунатурное моделирование подтвердило результаты, полученные в разделе 3, о сравнимой точности оптимального и подоптимального №5 алгоритмов в случае низких ионосферных сцинтилляций и более низкой точности оценок, получаемых алгоритмом №4.

Оценка вычислительной сложности исследуемых алгоритмов проводилась на основе имитационного моделирования. Подоптимальный алгоритм №4 не только проигрывает по

точности, но и приводит к дополнительным трудностям при реализации, а именно реализацию функции atan2 . В случае использования 3-элементной AP оптимальный алгоритм требует примерно в 2 раза больше операций умножения, чем подоптимальный алгоритм №5.

Для реализации рассмотренной в разделе 4 процедуры калибровки было разработано многопоточное приложение с удобным для пользователя интерфейсом в среде Rad Studio XE3 на языке C++ (рис. 7). В разработанном приложении оценки координат АЭ получаются на основе результатов многократных (H) измерений. В связи с этим в ходе реализации процедуры калибровки был введен показатель оценки качества получаемых координат антенной решетки в каждый момент времени и обобщенный показатель качества по результатам использования многократных измерений. Показателем качества было выбрано значение максимума функции R_{Σ} , нормированное к величине KL (т.е. к максимуму целевой функции при отсутствии шума). При этом можно исследовать изменение показателя качества во времени как до осуществления калибровки, так и после. Показатель качества в n -ый момент времени $Q_n = \max\{R_{\Sigma}\} / KL$. Соответственно обобщенный показатель качества калибровки:

$$Q = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^H Q_n \right) \cdot 100\% .$$

На первом этапе процедуры калибровки при получении грубых оценок углов ориентации устанавливается пороговое значение показателя качества $Q_{\text{парог}}^{(1)}$. Первый этап процедуры калибровки считается завершенным в тот момент времени, когда $Q_n \geq Q_{\text{парог}}^{(1)}$. Для второго этапа процедуры калибровки задается пороговое значение показателя качества $Q_{\text{парог}}^{(2)}$. Второй этап считается завершенным при таком количестве H многократных измерений, когда $Q \geq Q_{\text{парог}}^{(2)}$.

В Заключение диссертации кратко сформулированы основные достигнутые результаты и основные выводы по всей работе.

1. Основное влияние на точность пространственной ориентации оказывают условия приема сигналов от НКА. Так, например, при значении отношения сигнал/шум на входе устройства оптимальной корреляционной обработки $q = -30$ дБ не представляется возможным достигнуть той же точности в определении пространственной ориентации НО, как при значении $q = -15$ дБ, даже при увеличении числа используемых НКА до 12 в пределах рабочего созвездия одной ГНСС.

2. Начиная с определенного количества L используемых НКА ($L = 7 \dots 9$), дальнейшее увеличение их числа не приводит к существенному повышению точности оценок. Так, например, при отношении сигнал/шум $q = -15$ дБ величина СКО курсового угла, равная приблизительно $\sigma_{\hat{\alpha}} = 0.06^\circ$, сохраняется при $L \geq 7$, а СКО тангажа и крена $\sigma_{\hat{\beta}} = 0.15^\circ, \sigma_{\hat{\gamma}} = 0.1^\circ$ – при $L \geq 5$. При этом с увеличением количества используемых НКА нивелируется зависимость СКО получаемых оценок от значений истинных параметров пространственной ориентации в представляющем практический интерес диапазоне их значений.

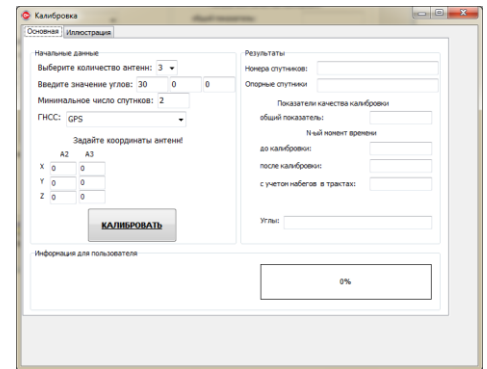


Рис.7

3. Уровень ионосферных сцинтилляций в области $S_4 \leq 0.4$ не приводит к существенному снижению точности оценок углов ориентации.

4. Разработанная модель алгоритма, оптимального по обобщенному критерию максимума правдоподобия, в предположении равенства амплитудных коэффициентов сигналов от различных НКА обеспечивает малые отличия СКО оценок углов ориентации от СКО, полученных с использованием реальных значений амплитудных коэффициентов сигналов НКА из рабочего созвездия ГНСС GPS. Так, например, при $q \geq -15$ СКО оценок углов ориентации для указанных двух вариантов наборов амплитудных коэффициентов совпадают в пределах доверительного интервала.

5. Реализация подоптимального алгоритма, основанного на использовании измеренных разностей фаз сигналов, принятых парами АЭ (алгоритм №3), требует измерения отношений сигнал/шум, соответствующих каждому НКА, и осуществления на их основе расчета дисперсий измеренных разностей фаз сигналов.

6. Эмпирическая целевая функция, соответствующая методу эталонных разностей фаз [16], полностью совпадает с целевой функцией $L_w^{((M-1)L)}(\theta)$ (алгоритм №4), соответствующей функции правдоподобия $W^{((M-1)L)}(\theta)$ (алгоритм №3), получаемой на основе анализа измеренных разностей фаз сигналов, принятых парами антенных элементов от различных НКА, в предположении равенства дисперсий этих разностей.

7. Целевая функция R_z (алгоритм №5), сформированная на основе рассмотрения задач пеленгации, может быть получена как предел целевой функции $B(\theta)$, используемой в оптимальном алгоритме, при больших значениях отношения сигнал/шум.

8. Исключение из функции правдоподобия случайных начальных фаз сигналов, излученных всеми используемыми НКА, по обобщенному методу максимума правдоподобия, используя сигналы, принятые лишь на одном из АЭ, приводит к формированию целевой функции $\tilde{D}(\theta)$ (алгоритм №2), включающей измерения лишь на «основных» базах.

9. Оптимальный алгоритм имеет преимущества как по точности получаемых оценок, так и по вероятности аномальных ошибок. Значения СКО оценок углов ориентации в ситуации низких ионосферных сцинтилляций совпадают в пределах доверительного интервала для оптимального, подоптимального №1 и подоптимального №5 алгоритмов. В то же время в ситуации, когда в созвездии присутствуют НКА, для которых имеют место как низкие (например, в области $q = -40$ дБ), так и высокие (например, в области $q = -10$ дБ) отношения сигнал/шум, подоптимальный алгоритм №5 уступает по точности определения курсового угла подоптимальным алгоритмам №2,3 на величину СКО 0.1° . Во всех рассмотренных условиях наименьшая точность оценок углов ориентации получается при использовании подоптимального алгоритма №4. Так, например, по отношению к алгоритму №2 даже при низких ионосферных сцинтилляциях ($S_4 \leq 0.4$) и $q \leq -25$ дБ имеет место увеличение СКО на 10%.

10. Использование предложенной процедуры калибровки позволяет существенно повысить точность получаемых оценок $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}$. Так, например, при начальном смещении ρ фазового центра относительно геометрического на 15 мм для типичного антенного элемента радиусом 25 мм значения СКО курсового угла после проведения калибровки снижаются в 3 раза, СКО тангажа и крена – на 40% и 30% соответственно.

11. С целью сокращения времени, затрачиваемого на моделирование процедуры калибровки, при больших отношениях сигнал/шум ($q \geq -15$ дБ) в качестве исходных данных можно использовать случайные значения измеренных разностей фаз при гауссовой аппроксимации закона их распределения.

12. Результаты полунатурного моделирования подтвердили выводы, полученные в разделе 3, о сравнимой точности оптимального и подоптимального №5 алгоритмов в случае низких ионосферных сцинтилляций и более низкой точности оценок, получаемых алгоритмом №4. Было показано, что значения оценок курсового угла и тангажа в разные моменты времени отличаются от истинных параметров пространственной ориентации на 0.1° для оптимального и подоптимального алгоритмов №5 и на $0.2-0.3^\circ$ для подоптимального алгоритма №4.

13. Анализ вычислительных затрат показал преимущества подоптимального алгоритма №5 в сравнении с оптимальным по количеству операций умножения. Так, например, в случае использования 3-элементной AP оптимальный алгоритм требует примерно в 2 раза больше операций умножения, чем подоптимальный алгоритм №5.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень **ВАК РФ**.

1. Венедиктов В.Т., Цикин И.А., Щербинина Е.А. Прием и обработка сигналов спутниковых навигационных систем в задаче пространственного позиционирования. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №2(169), 2013. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – с. 29 – 38.
2. Цикин И.А., Щербинина Е.А. Интерферометрический метод оценки параметров пространственной ориентации по максимуму правдоподобия с использованием эталонных разностей фаз. // Электромагнитные волны и электронные системы, №7, т. 19, 2014. – СПб.: Изд-во «Радиотехника», 2014. – с. 30 – 37.
3. Цикин И.А., Щербинина Е.А. Пространственная ориентация по максимуму правдоподобия с учетом влияния условий прохождения сигналов глобальных спутниковых навигационных систем. // Радиотехника, №9, 2015. – СПб.: Изд-во «Радиотехника», 2015. – с. 88 – 94.
4. Цикин И.А., Щербинина Е.А. Потенциальная точность оценки углов ориентации на основе анализа функции правдоподобия сигналов GPS на элементах приемной антенной решетки. // Радиотехника, №12, 2016. – СПб.: Изд-во «Радиотехника», 2016. – с. 144 – 149.

Патент на изобретение.

1. Пат. 2553270 Российская федерация, МПК G01S5/00.
Способ и устройство определения угловой ориентации летательных аппаратов / О.В. Царик, А.С. Давыденко, Е.А. Щербинина и др. – опубл. 2014

Статьи в сборниках материалов международных конференций, входящих в перечень **Scopus**

1. Shcherbinina E., Tsikin I. GPS antenna array calibration for attitude determination based on reference phase difference method // 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), // IEEEXplore Digital Library. – 2016.– P.174-177
2. Tsikin I., Shcherbinina E. GNSS Attitude Determination Based on Antenna Array Space-Time Signal Processing // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – Springer International Publishing, 2016. – С. 573-583.