

На правах рукописи



Давыденко Антон Сергеевич

**МЕТОД ЭТАЛОННЫХ РАЗНОСТЕЙ ФАЗ
В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ
ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2017

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Для определения пространственного положения автомобилей, кораблей, летательных аппаратов, в том числе беспилотных требуется решение задачи пространственной ориентации объекта в трехмерной системе координат. Основные усилия при ее решении прикладываются к поиску методов и алгоритмов повышения точности и быстродействия при определении угловых координат объекта. В процессе движения объекты могут совершать вращения вокруг центра масс. Так, например, современные беспилотные летательные аппараты (БЛА) могут изменять угол крена со скоростью до $50^\circ/\text{сек}$, при этом изменение угла происходит не только при разворотах, но и в прямолинейном полёте при воздействии бокового ветра. Объекты, рассматриваемые в подобных условиях, оказываются высокодинамичными. При этом, актуальным оказывается требование повышения темпа выдачи угловых координат объектов. Другим примером системы, где требуется решение задачи повышения быстродействия и точности пространственной ориентации носителя, является система передачи данных в Ku диапазоне частот с борта самолета (в том числе и беспилотного) на геостационарный спутник. Ширина диаграммы направленности луча антенны (на борту носителя) составляет от $1,5^\circ$ до 4° при необходимой точности наведения не хуже 10% от ширины диаграммы направленности, т.е. $0,15^\circ$, что накладывает серьезные ограничения на скорость работы бортовой навигационной системы самолета, так как в момент совершения манёвра углы могут меняться с высокой скоростью. При скорости изменения угла $40^\circ/\text{сек}$, отследить изменение этого угла с точностью $0,1^\circ$ чтобы не потерять связь со спутником, можно только при частоте получения информации о пространственном положении объекта не менее 400Гц. Таким образом, можно сделать вывод, что применительно к высокодинамичным объектам быстродействие при определении пространственной ориентации объектов является одним из важнейших параметров.

Для определения углового положения высокодинамичного объекта в пространстве могут быть использованы инерциальные системы, в состав которых входят датчики линейного ускорения (акселерометры) и угловой скорости (гироскопы или пары акселерометров, измеряющих центробежное ускорение). Одним из недостатков таких систем является то, что их необходимо настраивать (выставлять) не только по скорости и местоположению, но и по пространственному положению (ориентации относительно заданной базы, например горизонта). Процесс выставления занимает несколько минут или более. Другим недостатком является то, что их ошибка со временем накапливается. Это обусловлено интегрирующим действием самой системы. Скорость вычисляется интегрированием ускорения, и постоянная ошибка ускорения преобразуется в непрерывно нарастающую ошибку скорости. В связи с ошибками гироскопа возникают ошибки в определении направления при измерении кажущегося ускорения.

При использовании интерферометрических методов определения пространственной ориентации объектов широко применяются сигналы навигационных космических аппаратов (НКА), а многобазовые интерферометры строятся на основе приемных антенных решёток (АР). Основным преимуществом использования таких сигналов является достаточное количество «видимых» НКА практически в любой точке Земли. Одной из основных проблем при использовании интерферометрических методов является неоднозначность измерения разности фаз сигналов на антенных элементах. Один из известных способов определения пространственной ориентации объекта по сигналам НКА основан на решении систем линейных уравнений для определения координат антенных элементов (АЭ), образующих вектор-базы относительно одного опорного [Фатеев Ю.Л.]. При использовании такого метода определения координат вектора-базы прежде всего выбирается начальное состояние с минимальным числом источников излучения. Начальный набор решений составляется перебором всех возможных комбинаций фазовой неоднозначности, каждая из которых затем

проверяется путем решения системы уравнений, порядок которой определяется общим числом источников излучения. Наряду с высокой точностью определения параметров ориентации особенностью данного метода является существенная зависимость вычислительных затрат от количества АЭ и расстояния между ними, что значительно ограничивает быстродействие при оценке пространственной ориентации реальными цифровыми приемными устройствами.

Другим примером интерферометрических методов определения пространственной ориентации объектов является одноэтапный когерентно-некогерентный метод [Перов А.И.], основанный на использовании прямой функциональной зависимости между измеренными разностями фаз принимаемых сигналов НКА на различных АЭ и пространственным положением объекта. В данном методе формируется вектор измерений для однозначных разностей фаз по всем векторам-базам и всем видимым источникам сигнала. В соответствии с методом максимального правдоподобия составляется условие нахождения оптимальной оценки, которая определяется итерационным способом. Можно предположить, что этот метод также обеспечивает высокую точность ценой роста вычислительных затрат, ограничивающих быстродействие решения задачи пространственной ориентации.

Быстродействие и точность определения пространственной ориентации зависят от количества опорных источников излучения сигналов, уровня аддитивных канальных помех, числа антенных элементов (АЭ) в приемной антенной решётке, её топологии, наличия доплеровского смещения частоты, быстродействия работы вычислительного бортового устройства и др. Однако из имеющихся в литературе сведений относительно указанных и других подобных методов ориентации [работы P.J.G. Teunissen'a, С. Park'a, Поваляева А.А., Корогодина И. В., Цикина И.А., Щербининой Е.А. и др.] остается неясным достижимый уровень частоты выдачи решений, хотя достаточно очевидно, что высокая вычислительная сложность методов ориентации ограничивает уровень темпа выдачи угловых координат объектов.

Описанная проблема может быть в определенной степени решена при помощи предложенного в диссертационной работе метода эталонных разностей фаз, обеспечивающего высокое быстродействие при получении результата по сравнению с рассмотренными аналогичными методами и сохраняющего высокую эффективность в условиях доплеровского смещения частоты.

Важность практического решения задачи пространственной ориентации объектов определяет актуальность разработки универсального многофункционального устройства для экспериментального определения точности различных методов пространственной ориентации объекта в условиях доплеровского смещения частоты при использовании различного типа источников навигационных радиосигналов.

Объектом исследования в работе является предложенный в диссертации метод эталонных разностей фаз и устройства определения пространственной ориентации объекта, в том числе при наличии доплеровского смещения частоты.

Предметом исследования является быстродействие определения пространственной ориентации высокодинамичных объектов при сохранении высокой точности в условиях доплеровского смещения частоты.

Целью диссертационной работы является повышение быстродействия определения пространственной ориентации высокодинамичных объектов при сохранении высокой точности на основе использования предложенного в работе метода эталонных разностей фаз в условиях доплеровского смещения частоты.

Для достижения данной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Разработка метода эталонных разностей фаз для повышения быстродействия определения пространственной ориентации объектов при приеме радиосигналов многобазовыми интерферометрами в условиях доплеровского смещения частоты.

2. Разработка имитационной модели для исследования особенностей работы всех составляющих метода эталонных разностей фаз с учётом характеристик современной элементной базы.

3. Исследование быстродействия определения пространственного положения объектов методом эталонных разностей фаз в условиях доплеровского смещения частоты при реализации на современной элементной базе.

4. Исследование точности определения пространственного положения объектов методом эталонных разностей фаз в условиях доплеровского смещения частоты.

5. Разработка и построение многофункционального цифрового приемного устройства на базе сигнальных процессоров и программируемых логических интегральных схем, реализующего метод эталонных разностей фаз.

6. Проведение исследований эффективности разработанного метода эталонных разностей фаз в реальных условиях.

Научная новизна работы

1. Разработан метод эталонных разностей фаз, позволяющий повысить быстродействие определения пространственной ориентации высокодинамичных объектов при сохранении высокой точности, основанный на сравнении измеряемых разностей фаз радиосигналов на антенных элементах объекта со значениями разностей фаз, полученными для различных углов прихода волны и записанными в памяти цифрового приемного устройства.

2. Для разработанного метода эталонных разностей фаз получена зависимость степени снижения требований к количеству вычислительных операций в сравнении с классической реализацией интерферометрических методов при цифровой реализации алгоритмов определения пространственной ориентации, необходимых для обеспечения заданной точности в условиях доплеровского смещения частоты.

3. Выявлена зависимость точности определения пространственной ориентации для высокодинамичных объектов в зависимости от количества векторов-баз и источников опорных радиосигналов.

4. Получены зависимости точности определения пространственного угла высокодинамичных объектов от величины доплеровского смещения частоты и уровня канального аддитивного шума.

5. Для разработанного метода эталонных разностей фаз получена зависимость вероятности аномальных ошибок от количества расположенных на объекте векторов-баз и числа источников опорных сигналов.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенный в диссертационной работе метод эталонных разностей фаз позволяет более чем на порядок повысить частоту выдачи решений о пространственной ориентации высокодинамичных объектов, сохранив точность, сравнимую с достигаемой при использовании существующих интерферометрических методов.

2. Предложенный метод определения пространственной ориентации объектов позволяет решить проблему фазовой неоднозначности, возникающей при расстояниях между элементами приемной антенной решетки, превышающих единицы длин волн, на основе совместного использования векторов-баз, увеличения их числа (до 10...12), а также увеличения числа используемых источников излучения принимаемых сигналов (не менее 3-х).

3. Использование предложенного метода в условиях доплеровского смещения частоты при увеличении числа источников излучения или числа векторов-баз позволяет снизить среднее значение ошибки в определении пространственной ориентации объекта. Так, при увеличении числа используемых источников излучений с 1-ого до 10-ти, среднее значение

ошибки может быть уменьшено более чем на 80%, а увеличение числа векторов-баз с 2-х до 8-ми, при малом числе источников излучения, позволяет уменьшить ошибку на 13%.

4. Использование предложенного метода в условиях доплеровского смещения частоты при увеличении числа векторов-баз с 3 до 12 позволяет снизить вероятность аномальной ошибки при определении пространственной ориентации объекта, доведя ее до потенциально возможной без доплеровского смещения частоты (отклонение составляет не более 1%).

5. Экспериментально показано, что при использовании предложенного метода эталонных разностей фаз требуемое быстродействие определения пространственной ориентации высокодинамичных объектов (единицы мсек) может быть легко реализовано на современной программируемой элементной базе путем комбинирования технологий ПЛИС и ЦПОС.

Практическая ценность новых научных результатов

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что предложенный метод эталонной разности фаз позволяет существенно повысить быстродействие определения пространственной ориентации объектов при сохранении высокой точности для высокодинамичных объектов по сравнению с аналогичными интерферометрическими методами.

Внедрение результатов диссертации

Результаты диссертационных исследований опубликованы в 7 статьях в ведущих рецензируемых журналах и прошли апробацию на 3 научно-технических конференциях. На основные разработанные методы получено 4 патента. Основные результаты исследований реализованы в ОКР «Дубрава» (головой исполнитель – общество с ограниченной ответственностью «Специальный Технологический Центр» (ООО «СТЦ»)), получены патенты: №2514197, №2374659, №2553270, №2513900), так же результаты внедрены в НИР «Исследование характеристик сигналов глобальных спутниковых навигационных систем», проводимой в Санкт–Петербургском государственном политехническом университете совместно с ООО «СТЦ» в 2015–2017 годах (Договор № 143427504 от 01.08.2015).

Апробация работы

Материалы диссертационного исследования апробированы на следующих конференциях:

1. Конференция с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 3-4 мая, 2012.
2. Научно-практическая конференция с международным участием Неделя науки СПбГПУ, 2015.
3. 71-я научно-техническая конференция СПбНТОРЭС им. А.С. Попова, 2016.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 4 статьи — в ведущих рецензируемых отечественных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 4 патента на изобретение, 3 статьи — в сборниках материалов всероссийских и международных конференций. Основные результаты в диссертационной работе получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 158 страниц, 94 рисунка, 6 таблиц, список используемой литературы из 84 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи работы, приведены сведения о важности практического решения поставленных задач, кратко изложена структура диссертационной работы.

В первом разделе в общей постановке описана задача определения пространственной ориентации различных объектов на примере беспилотных летальных аппаратов и рассмотрены различные известные способы её решения.

Современные БЛА являются ярким представителем высокодинамичных объектов, так как они могут изменять своё угловое положение с высокой скоростью (до 50°/сек). В настоящее время на БЛА широко используется аппаратура регистрации изображений с частотой более 25 кадров в секунду, что требует определения пространственной ориентации БЛА и координат с частотой не менее 25Гц. Другим примером системы, где требуется решение задачи повышения быстродействия определения пространственной ориентации, является система передачи данных в Ku диапазоне частот с борта самолета (в том числе беспилотного) на геостационарный спутник, где требуется частота получения навигационной информации не ниже 400Гц.

Задача определения пространственной ориентации высокодинамичных объектов может быть решена при помощи разных методов: инерциальных и интерферометрических. Главной особенностью инерциальных методов является то, что ошибка получаемого решения со временем накапливается, из-за интегрирующих действий самой системы, что при многих плюсах инерциальных систем (автономность, темп выдачи решения), затрудняет их использование для определения пространственной ориентации высокодинамичных объектов. Интерферометрические методы, основанные на использовании сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, свободны от указанного недостатка инерциальных систем и позволяют получить высокую точность определения параметров пространственной ориентации. В данном разделе диссертации кратко рассмотрены методы, основанные на решении систем линейных уравнений для определения координат АЭ, которые образуют вектор-базы относительно одного опорного [Фатеев Ю.Л.], либо на использовании прямой функциональной зависимости между измеренными разностями фаз принимаемых сигналов НКА на различных АЭ и пространственным положением объекта [Перов А.И.]. Эти методы характеризуются высокой точностью определения углов ориентации объектов, однако их реализация требует существенных вычислительных затрат, что неизбежно снижает темп выдачи решений. На основе анализа литературы по данным методам остаётся не ясным какой может быть достигнут темп выдачи информации о пространственной ориентации объектов.

Рассмотрены навигационные сигналы, используемые в ГНСС, при этом показано, что при динамических изменениях пространственного положения объекта необходимо учитывать дополнительный доплеровский сдвиг частоты колебания, появление которого может привести к существенной погрешности определения разности фаз принимаемого сигнала на парах АЭ, образующих вектор-базы.

Решение описанных проблем возможно на основе предложенного в работе метода эталонных разностей фаз, обеспечивающего большее быстродействие при получении результата по сравнению с рассмотренными аналогичными методами и сохраняющего высокую эффективность в условиях доплеровского смещения частоты.

В конце первого раздела подробно сформулированы цель работы и научные задачи.

Во втором разделе предложен и подробно описан метод эталонных разностей фаз (ЭРФ), позволяющий повысить быстродействие определения пространственной ориентации высокодинамичных объектов при сохранении высокой точности. Основная идея этого метода заключается в том, что набор измеренных разностей фаз на всех АЭ, образующих АР, последовательно сравнивается с заранее подготовленными (эталонными) наборами

разностей фаз для всех возможных пространственных положений АР с заданным шагом. В качестве решения выбираются углы положения АР, при которых эталонный набор разностей фаз по тому или иному критерию наиболее близок к измеренному набору.

В общем случае при наличии S источников излучения на каждом шаге сканирования для всех K векторов-баз $\overline{A_k}$, где $k = 1, 2, \dots, K$, производится вычисление теоретической эталонной разности фаз $\Delta\varphi_{эм.k}^s$, где $s = 1, 2, \dots, S$. Эти значения могут быть вычислены заранее и храниться в памяти вычислительного устройства. В процессе работы при сканировании осуществляется сравнение для каждого вектора-базы $\overline{A_k}$ измеренной разности фаз $\Delta\varphi_{изм.k}^s$ и эталонной. То значение угла, при котором среднее отклонение будет минимальным, является искомым.

Для одномерного случая определения курсового угла α нормированная функция среднего отклонения $\Delta\varphi(\alpha)$ вычисляется по формуле:

$$\Delta\varphi(\alpha) = \frac{1}{SK} \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (\Delta\varphi_{эм.k}^s(\alpha) - \Delta\varphi_{изм.k}^s)^2. \quad (1)$$

Особенность метода заключается в том, что отклонения вычисляются для каждого вектора-базы и источника отдельно, а далее результаты объединяются. Именно этот факт позволяет при увеличении числа векторов-баз исключить фазовую неоднозначность. Вид функции (1) для $S=4$ и $K=4$ в

частном случае при определении курсового угла α и истинном значении $\alpha = \alpha_{ист} = 30^\circ$ приведен на рис. 1. Показана возможность повышения точности определения курсового угла путем увеличения расстояния между антеннами при компенсации неоднозначности

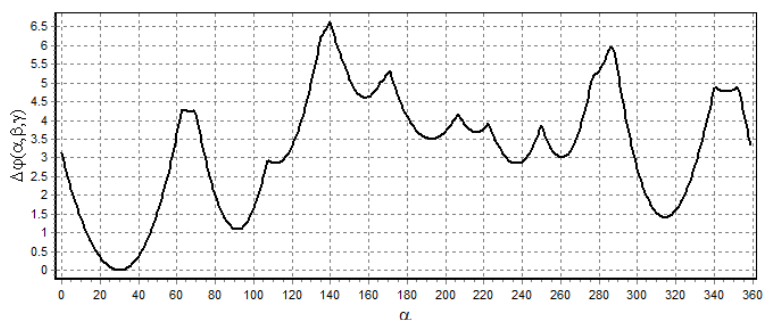


Рис. 1

в определении углов поворота объекта. Доказано, что при произвольной длине векторов-баз и, соответственно, при произвольном числе неоднозначностей, их устранение возможно путем увеличения количества векторов-баз, расположенных на объекте произвольным образом.

При определении функции среднего отклонения важным является оценка точности вычисления $\Delta\varphi(\alpha)$, которая зависит от шага определения значений эталонных разностей фаз. Проведена оценка изменения эталонной разности фаз между двумя соседними значениями. Для этого из следующего значения функции эталонной разности фаз было вычтено её предыдущее значение, полученное на предыдущем шаге. В общем виде приращение функции эталонной разности фаз может быть записано в виде:

$$\Delta\Delta\varphi_{эм.}(\alpha) = \Delta\varphi_{эм.}(\alpha_n) - \Delta\varphi_{эм.}(\alpha_{n-1}). \quad (2)$$

Полученный результат представлен на рис. 2. На этом рисунке шаг сканирования составляет $\Delta\alpha = 0.01^\circ$. На рис. 2 видно, что при данном шаге сканирования, эталонная разность фаз между соседними шагами изменяется незначительно. Максимальное приращение составляет около 0.15° . Используя эту методику можно определить

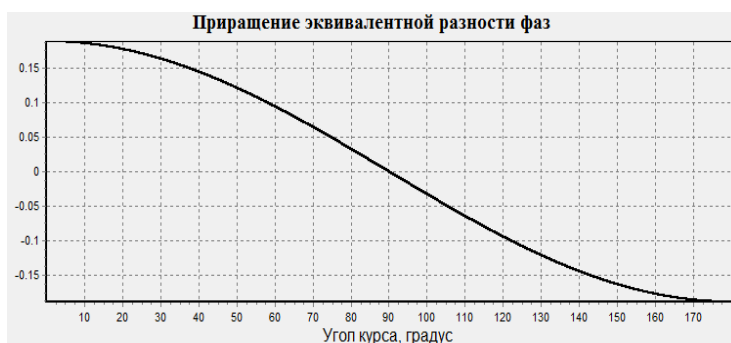


Рис. 2

необходимый шаг сканирования и необходимую точность измерения разности фаз. В области 90° приращение около нуля, это говорит о том, что в данном случае различия эталонной разности фаз на соседних шагах сканирования практически отсутствует. Заметим, что если ошибка измеренной разности фаз будет сильно превышать приращение эталонной разности фаз для соседних шагов сканирования, то полученное в результате сравнения решение, не смотря на малый шаг сканирования, будет неточным.

На рис.3 показана область глобального минимума функции среднего отклонения $\Delta\varphi(\alpha, \beta, \gamma)$, которая вычисляется при одновременном определении курсового угла α , крена β и тангажа γ в частном случае, когда истинным положением объекта является $\alpha = \alpha_{ист} = 30^\circ$, $\beta = \beta_{ист} = 0^\circ$ и $\gamma = \gamma_{ист} = 0^\circ$. Из рис. 3 видно, что относительно истинного положения объекта вид многомерной функции среднего отклонения симметричный. Это позволяет утверждать, что точность определения всех трёх углов в общем случае оказывается одного порядка. При этом обеспечивается устойчивая

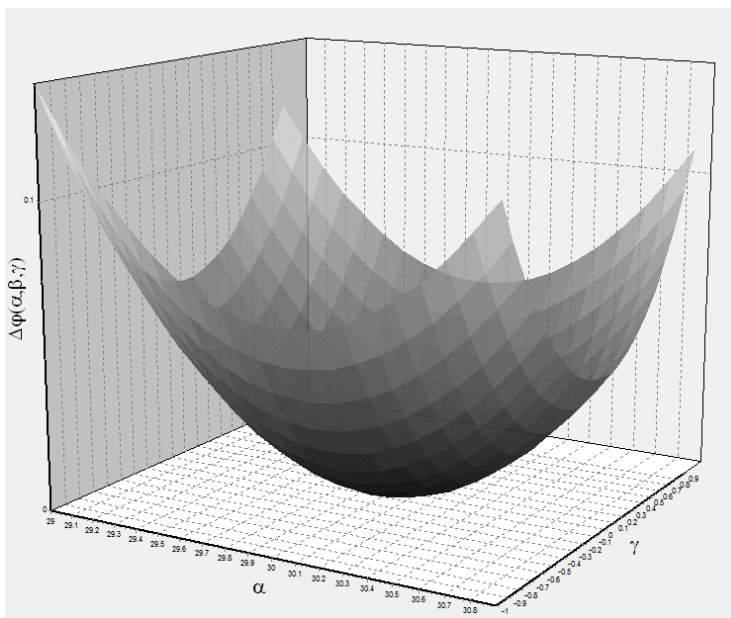


Рис. 3

сходимость итерационных методов для определения точки экстремума.

Показано, что преимущество метода эталонных разностей фаз заключается в том, что полный перебор можно выполнить всего один раз, а далее выполнять процедуру слежения за перемещением минимума функции среднего отклонения. Пусть положение объекта изменилось на 10° . На рис. 4 представлена функция среднего отклонения до изменения положения объекта (тонкая линия) и после (толстая линия). Можно заметить, что в области главного экстремума функции среднего отклонения также смещены на 10° . Первоначально у нас имеется набор измеренных разностей фаз для угла поворота объекта $\alpha = \alpha_{ист} = 20^\circ$. Процедура слежения (например, с использованием метода покоординатного спуска или метода золотого сечения) сходится в точке, соответствующей углу поворота объекта 20° (рис. 4; точка 1). После того, как угол поворота объекта изменился, изменятся величины измеренных разностей фаз и, следовательно, величина отклонения для данного направления. Этой ситуации соответствует точка 2 (рис. 4). Можно заметить, что в этом случае отклонение для направления $\alpha = 21^\circ$ уже меньше, чем для $\alpha = 20^\circ$, и по процедуре слежения происходит

вычисление отклонения для новых направлений, двигаясь по стрелке вниз. На каждом шаге происходит сравнение значения среднего отклонения для нового направления и двумя соседними с ним. В результате этого процесса за несколько шагов будет достигнута точка 3 (рис. 4). В этом случае величина отклонения для направления 30° меньше, чем для соседних от него: 29° и 31° . В простейшем случае происходит приближение с равномерным шагом (например 1°). При более сложных процедурах слежения величина шага может быть плавающей, либо вообще отсутствовать (метод золотого сечения).

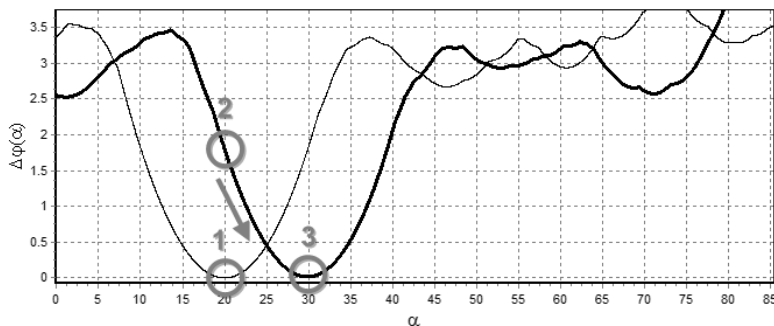


Рис. 4

Рассмотренный механизм позволяет существенно повысить частоту выдачи угловых решений. Так, при одинаковых процессорах ARM Cortex-A17, как показано ниже в четвёртом разделе диссертации, частота выдачи решений оказывается в 60 раз выше, чем в существующих устройствах, использующих метод, основанный на решении систем линейных уравнений. Точность определения углов методом ЭРФ при этом оказывается близкой к точности, достигаемой при использовании метода, основанного на решении систем линейных уравнений [Фатеев Ю.Л.]. Среднее значение величины потери точности при равных условиях сравнения составляет около 1%.

В третьем разделе рассмотрено влияние доплеровского смещения частоты обрабатываемых сигналов на работу метода эталонных разностей фаз. Для упрощения рассмотрен случай кругового движения объекта (рис. 5). Значение доплеровского смещения частоты зависит от величины угла между направлением движения и направлением на источник излучения. Показательными являются положения 1 и 2 (рис. 5) объекта на окружности вращения. В положении 1 векторы скорости направлены на источник излучения, и доплеровское смещение частоты оказывается с положительным знаком. В положении 2 векторы скорости будут направлены от источника излучения, что вызовет смещение частоты с отрицательным знаком.

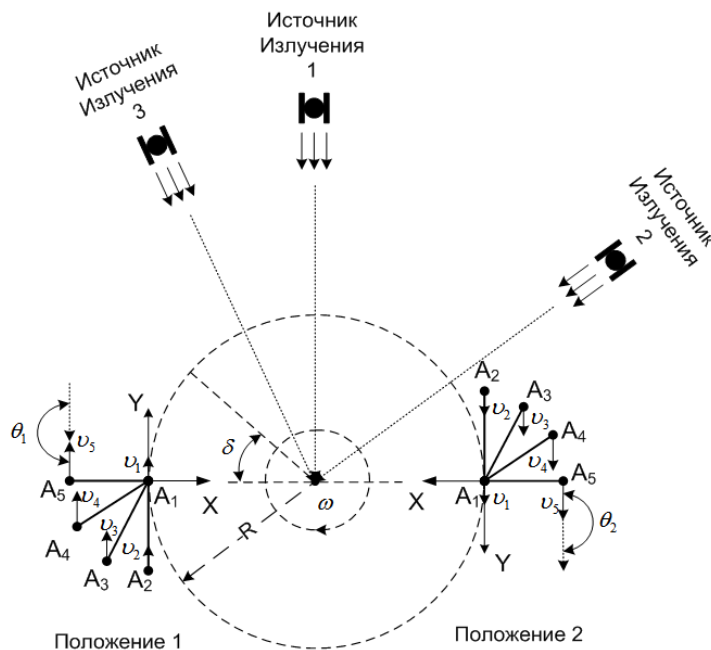


Рис. 5

При учёте доплеровского смещения частоты колебания на каждом из приёмных антенных элементов A_i возникает определенный набег фазы. При этом измеренная разность фаз, очевидно, становится зависящей от времени $\Delta\varphi_{изм.k}^l(t)$. Тогда выражение (1) преобразуется к виду:

$$\Delta\varphi(\alpha, t) = \frac{1}{KS} \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (\Delta\varphi_{эм.k}^s(\alpha) - \Delta\varphi_{изм.k}^s(t))^2. \quad (3)$$

При этом функция $\Delta\varphi_{изм.k}^s(t) = \Delta\varphi_{изм.k}^s + \Delta\varphi_{дон.k}^s(t)$ будет зависеть от величины измеренной разности фаз $\Delta\varphi_{изм.k}^s$ и дополнительной разности фаз $\Delta\varphi_{дон.k}^s(t)$, зависящей от времени.

Показано, что при наличии доплеровского смещения частоты колебания наблюдается не только смещение минимального значения функции среднего отклонения, но и изменение величины этой функции. На рис.6 представлена функция $\Delta\varphi(\alpha, t)$ при отсутствии доплеровского сдвига частоты колебания (пунктирные линии – объект не движется) и при наличии такого сдвига (сплошные линии – объект движется). Минимальное значение функции $\Delta\varphi(\alpha, t)$ при отсутствии движения объекта в рассматриваемом случае соответствует $\alpha_{мин\omega} = 20^\circ$. При

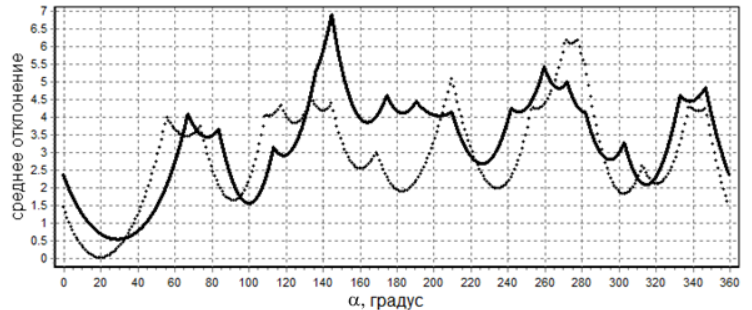


Рис. 6

наличии доплеровского смещения частоты колебания $\alpha_{мин\omega} \approx 30^\circ$. В этом случае ошибка при оценке данного угла поворота объекта по окружности составляет около 10° . На рис. 6 можно заметить, что при появлении доплеровского смещения частоты происходит уменьшение соотношения между минимальным значением и значением ближайшего по величине побочного минимума функции среднего отклонения, что увеличивает вероятность аномальной ошибки (выбора в качестве решения ложного направления).

В разделе 3 разработаны методы повышения точности пространственной ориентации объектов при наличии доплеровского смещения частоты. Так, например, считая известным скорость движения объекта, угол θ между направлением движения и направлением распространения сигнала от источника излучения, можно рассчитать величину доплеровского смещения частоты. Запишем (3) в виде:

$$\Delta\varphi(\alpha, p\Delta t) = \frac{1}{LN} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N \left((\Delta\varphi_{эм.k}^l(\alpha) - \Delta\varphi_{изм.k}^l - (\Delta\varphi_{дон.k}^l(p\Delta t) - \Delta\varphi_{корр.дон.k}^l(p\Delta t)))^2 \right), \quad (4)$$

где интервал времени Δt выбирается, исходя из требований максимальной компенсации доплеровского смещения частоты при вычислении функции $\Delta\varphi(\alpha, p\Delta t)$. Очевидно, что при равенстве теоретических (вычисленных) значений функции $\Delta\varphi_{корр.дон.k}^l(\Delta t)$ и значений $\Delta\varphi_{дон.k}^l(p\Delta t)$ в моменты времени $p\Delta t$ ($p=0,1,2,\dots$), происходит полная компенсация доплеровского смещения частоты, и (4) переходит в (1). В то же время в промежутках между моментами времени $p\Delta t$ и $(p+1)\Delta t$ компенсация влияния доплеровского смещения частоты будет неполной.

При помощи имитационного моделирования рассмотрена возможность уменьшения влияния доплеровского смещения частоты колебания за счёт увеличения числа используемых источников сигнала, а также изменения их взаимного расположения. На рис. 7 приведены зависимости среднего значения ошибки в определении углов поворота объекта для 3-х (сплошная линия) и 1-го (штрих линия) источника колебаний. Как следует из сравнения зависимостей на рис. 7, при увеличении числа используемых источников излучений среднее значение ошибки в определении угла поворота объекта уменьшается,

причем при высоких скоростях вращения объекта (до 100 %/сек) это уменьшение составляет около 80%.

Показано, что выбор равномерного относительно объекта расположения источников излучения позволяет в некоторых случаях компенсировать ошибку определения угла поворота объекта из-за доплеровского смещения частоты на величину до 60% от одностороннего расположения источников излучения.

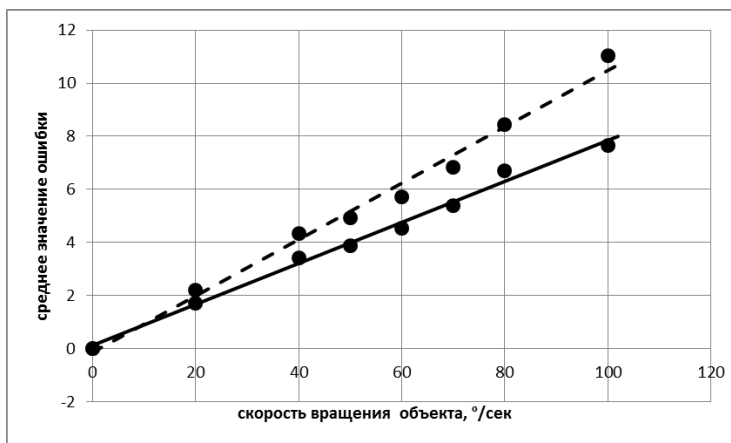


Рис. 7

Эффективность компенсации ошибки в определении пространственного угла путем увеличения числа векторов-баз рассмотрим на примере движения объекта по окружности (см. рис. 5) со скоростью 40 %/сек. Вращение происходит вокруг оси самолёта при совершении манёвра по углу крена. На рис. 8 по оси ординат отложены ошибки определения угла, а по оси абсцисс – значения числа векторов-баз. Рассмотрены два случая: 4 источника излучения (сплошная линия) и 10 источников излучения (пунктирная линия). Как следует из анализа кривых на рис. 8, при малом числе источников излучения увеличение числа векторов-баз для данных условий доплеровского смещения частоты, позволяет уменьшить ошибку в определении угла с 2° (при 2 векторах-базах) до 1,79° при 8 векторах-базах, что составляет 13% от начальной ошибки. При увеличении числа источников излучения до 10 эффективность увеличения числа векторов-баз снижается. Это связано с тем обстоятельством, что при увеличении числа источников излучения и так наблюдается компенсация доплеровского смещения частоты почти на 80%.

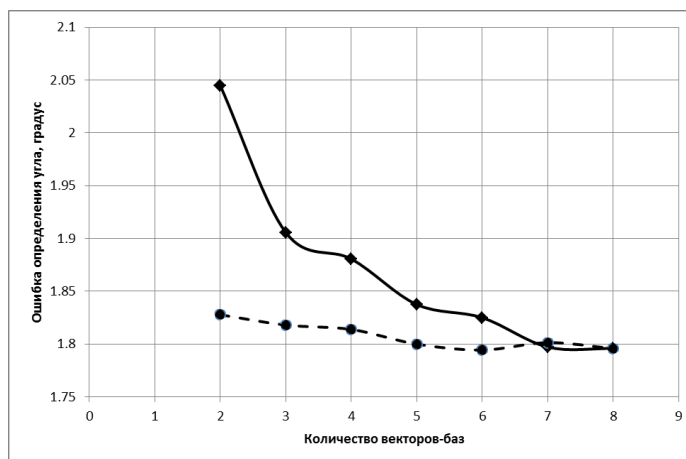


Рис. 8

В четвёртом разделе разработана имитационная модель цифрового многоканального приемного тракта, которая позволяет выполнять все необходимые исследования точности определения пространственной ориентации объекта при наличии доплеровского смещения частоты и с учетом требований к быстродействию квадратурных каналов обработки радиосигналов. Имитационная модель обеспечивает функциональность использования реальных алгоритмов, максимально приближенных к экспериментальной аппаратуре. Структура имитационной модели представлена на рис. 9. Имитационное моделирование позволило выполнить оценку точности и определить вероятностные характеристики нахождения наиболее достоверного направления углов курса, тангажа и крена при наличии аддитивных гауссовых шумов и доплеровского смещения частоты.

Особый интерес представляет распределение значений функции среднего отклонения для направления, соответствующего глобальному минимуму $\alpha = \alpha_{ист.}$ и ближайшим ложным $\alpha = \alpha_{ложн.l}$, где l – номер ложного минимума. На рис. 10 представлена функция среднего отклонения $\Delta\varphi(\alpha)$. Сплошной стрелкой показано направление главного минимума $\alpha_{ист.}$,

пунктирными – направления для пяти ближайших ложных минимумов $\alpha_{ложн.l}$. Наличие ложных минимумов будет влиять на вероятность правильного решения. Если под влиянием шума вместо истинного положения объекта $\alpha = \alpha_{ист.} = 50^\circ$, соответствующего глобальному минимуму функции среднего отклонения (рис. 10), может быть выбрано направление ближайшего ложного минимума $\alpha = 110^\circ$, то это решение будем считать не простой (нормальной) ошибкой в определении угла α , а грубой (аномальной) ошибкой. На рис. 11 представлены гистограммы распределения значений для направления $\alpha_{ист.}$ (гистограмма 1) и $\alpha_{ложн.1}$ (гистограмма 2).

Кривые на рис. 11 характеризуют вероятность аномальной ошибки, проявляющейся в выборе направления $\alpha_{ложн.l}$ вместо $\alpha_{ист.}$. Проведено моделирование метода определения пространственной ориентации объектов, основанного на решении систем линейных уравнений. На основе результатов моделирования получено, что даже при использовании современного процессора ARM Cortex-A17 темп выдачи решения будет не более 300Гц, а метод эталонных разностей фаз, как было показано во втором разделе диссертации, позволяет получать частоту более чем 18кГц.

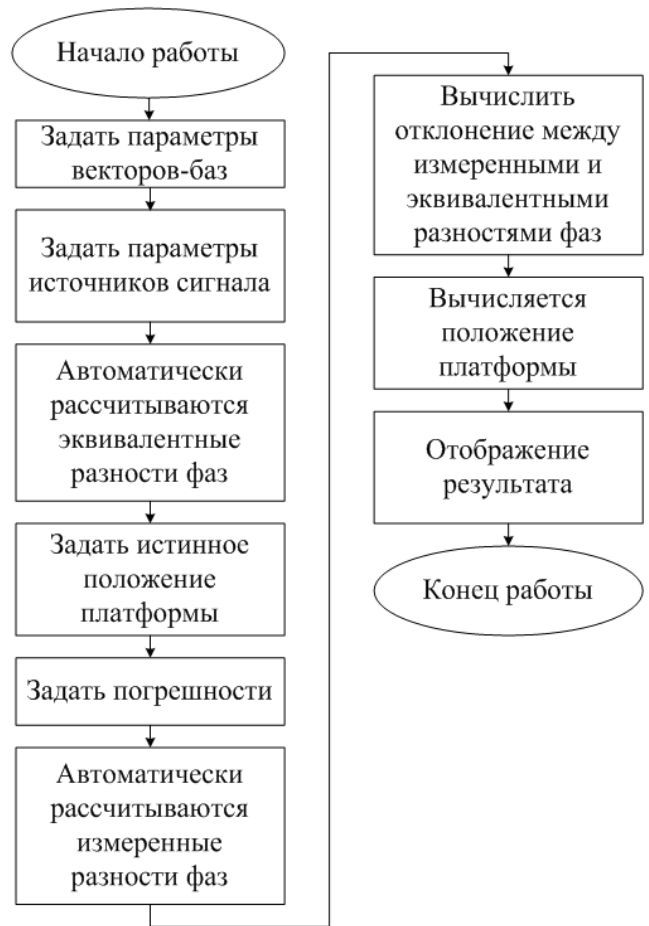


Рис. 9

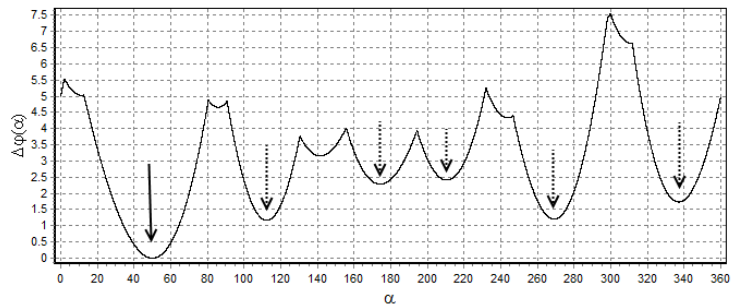


Рис. 10

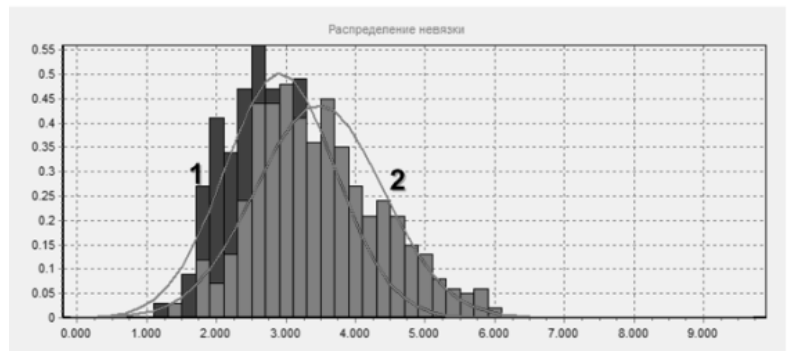


Рис. 11

В пятом разделе приводятся результаты экспериментального исследования цифрового многоканального устройства определения пространственной ориентации, разработанного на основе метода эталонных разностей фаз.

В рамках выполнения диссертационной работы разработано и реализовано цифровое многоканальное устройство высокоточного определения пространственной ориентации на основе предложенного метода эталонных разностей фаз, структурная схема которого представлена на рис. 12. Устройство осуществляет приём сигналов глобальных спутниковых навигационных систем при помощи антенной решётки, состоящей из трёх элементов. Сигналы поступают на соответствующие входы синфазного многоканального приемника, где происходит их селекция, перенос на промежуточную частоту и усиление. Аналоговые сигналы с выходов приемника на промежуточной частоте поступают на плату цифровой обработки сигналов, где производится их оцифровка при помощи АЦП. Плата цифровой обработки сигналов состоит из следующих элементов:

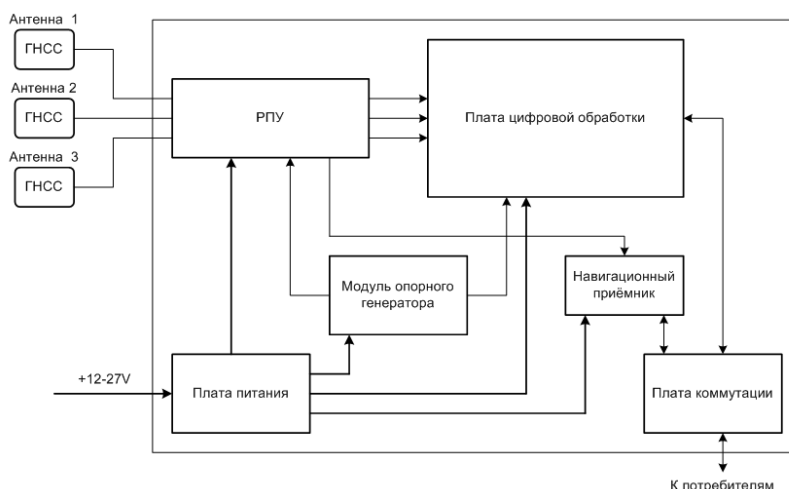


Рис. 12

цифрового сигнального процессора (ЦСП) TMS320C6455;

- программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) XC5VSX50T семейства Virtex-5;
- трёх АЦП типа LTC2208.

Далее цифровые сигналы подаются на микросхему ПЛИС, где подвергаются операции понижающего преобразования, в результате которой спектр сигнала, сосредоточенного в области промежуточной частоты, переносится в область нулевой частоты, с одновременным разложением сигнала на две компоненты – синфазную и квадратурную для последующей обработки. Используя данные от приёмника навигационных сигналов, на плате цифровой обработки также рассчитываются эталонные разности фаз. В результате обработки этих данных определяются углы, характеризующие положение объекта в пространстве. Разработанный макет представлен на рис. 13.



Рис. 13

Для экспериментальных исследований устройства как в статическом режиме без доплеровского смещения частоты, так и при наличии такого смещения частоты, был создан стенд, состоящий из антенной системы, поворотного устройства и блока измерительных приборов (рис. 14). Антенная система представляет собой набор из четырёх жесткозакрепленных металлических площадок. На трёх из них располагаются антенные элементы, четвертая используется в качестве противовеса. Антенная система жёстко зафиксирована на поворотном устройстве. В качестве поворотного устройства использовалось прецизионное опорно-поворотное устройство MSO-2 (производства фирмы EVPU Defence a.s., Чехия), которое обладает следующими основными характеристиками: диапазон вращения по углу азимута 360° , диапазон вращения по углу склонения от -40° до 40° , точность позиции – 1мрад. Собранный стенд был закреплен на крыше здания для качественного приёма сигналов глобальных спутниковых навигационных систем.

В ходе экспериментальных исследований, в частности, показано, что с увеличением используемого числа источников излучения удастся повысить вероятность определения угла курса с заданной точностью. Так, при отношениях сигнал/шум 16,5 дБ увеличение числа источников излучения с 3 до 10 почти вдвое снижает вероятность аномальной ошибки.

В целом, при сравнении характеристик, полученных экспериментальным путем и путем имитационного моделирования, выявлено, что различия в достигаемой точности позиционирования составляют не более 8%. Указанное отличие может быть связано с неоднородностью аналоговых трактов синфазного приёмного устройства.



Рис. 14

Экспериментально подтверждено, что использование предложенного и разработанного в диссертации метода эталонных разностей фаз в реальных условиях приема сигналов в рабочем диапазоне значений отношения сигнал/шум позволяет существенно увеличить быстродействие аппаратуры принятия решений о значении пространственного угла поворота объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена задаче определения пространственной ориентации малогабаритных высокочастотных объектов, одними из представителей которых можно считать беспилотные летательные аппараты. На основе анализа аппаратуры, устанавливаемой на данные носители, а также характерных траекторий и параметров маневрирования сформулированы основные требования к аппаратуре определения пространственной ориентации. К таким требованиям в первую очередь относятся высокая точность определения пространственной ориентации при высокой частоте выдачи решений.

В диссертации предложен и разработан новый интерферометрический метод определения пространственной ориентации объектов, названный методом эталонных разностей фаз, позволяющий существенно повысить быстродействие определения пространственной ориентации высокочастотных объектов при сохранении высокой точности. Основу метода составляет сравнение измеряемых разностей фаз радиосигналов на

антенных элементах объекта со значениями разностей фаз, рассчитанными для различных углов прихода сигналов и записанными в памяти цифрового приемного устройства. При этом пролучены следующие результаты.

1. Для разработанного метода показана возможность устранения фазовой неоднозначности, характерной для существующих интерферометрических методов, возникающей при увеличении расстояния между элементами антенной решётки для повышения точности определения пространственной ориентации, на основе совместного использования векторов-баз, увеличения их числа, а также увеличения числа используемых источников излучения принимаемых сигналов.

2. Разработана имитационная модель цифрового многоканального приемного тракта, которая позволяет выполнять все необходимые исследования точности пространственной ориентации объектов при наличии доплеровского смещения частоты и с учетом требований к быстродействию квадратурных каналов обработки радиосигналов. Оценены степень снижения точности определения пространственной ориентации и увеличения вероятности аномальной ошибки в условиях доплеровского смещения частоты, характерного для высокодинамичных беспилотных летательных аппаратов.

3. Показано, что использование предложенного метода в условиях доплеровского смещения частоты при увеличении числа источников излучения или числа векторов-баз позволяет снизить среднее значение ошибки в определении пространственной ориентации объекта. Так, при увеличении числа используемых источников излучений с 1-ого до 10-ти, среднее значение ошибки может быть уменьшено более чем на 80%, а увеличение числа векторов-баз с 2-х до 8-ми, при малом числе источников излучения, позволяет уменьшить ошибку на 13%. Использование предложенного метода в условиях доплеровского смещения частоты, которое вызвано высокодинамичным вращением объекта вокруг центра масс, при увеличении числа векторов-баз с 3 до 12 позволяет снизить вероятность аномальной ошибки при определении пространственной ориентации объекта, доведя ее до потенциально возможной без доплеровского смещения частоты (отклонение составляет не более 1%).

4. Для оценки возможности реализации метода эталонных разностей фаз разработано и построено экспериментальное цифровое многоканальное приемное устройство с применением сигнальных процессоров и программируемых логических интегральных схем, проведены экспериментальные исследования характеристик точности определения ориентации и быстродействия, подтверждающие результаты имитационного моделирования. В рамках диссертационной работы изготовлено цифровое устройство определения пространственной ориентации объекта, и выполнен большой объем экспериментальных исследований по определению точностных характеристик. При сравнении характеристик, полученных экспериментальным путем и путем имитационного моделирования, выявлено, что различия в достигаемой точности позиционирования составляют не более 8%. Экспериментально показано, что при использовании предложенного метода эталонных разностей фаз требуемое быстродействие определения пространственной ориентации высокодинамичных объектов (частота выдачи решений не менее 500 Гц) может быть легко реализовано на современной программируемой элементной базе путем комбинирования технологий ПЛИС и ЦПОС.

При изготовлении устройства элементная база выбиралась с учётом ограничений для малогабаритных БЛА: потребляемая электроэнергия, масса-габаритные характеристики, условия эксплуатации. Результаты этих исследований воплощены в реальные образцы аппаратуры, которые доведены до стадии серийного производства с учётом опыта, полученного в ходе эксплуатации на таких носителях как: БЛА, вертолёт КА-226, дирижабль АУ-30, различный автотранспорт.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК.

1. *Ветров Ю.В., Царик О.В., Давыденко А.С. Повышение точности пространственного позиционирования объектов за счёт использования сигналов спутниковых навигационных систем. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №76, 2009. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. — с. 14–20.*

2. *Давыденко А.С., Макаров С.Б. Применение метода эталонной разности фаз для определения пространственной ориентации объекта. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2 (169), 2013– СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. — с. 39–46.*

3. *Макаров С.Б., Давыденко А.С. Снижение влияния доплеровского сдвига частоты колебания на точность определения пространственного положения объекта. // Электромагнитные волны и электронные системы, № 7, 2014. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2014. – с. 24–29.*

4. *Давыденко А.С., Макаров С.Б. Анализ реализационных возможностей метода эквивалентной разности фаз для определения пространственной ориентации при наличии доплеровского смещения частоты // Радиотехника, №9, 2015. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2015. – с. 31-38.*

Патенты на изобретения

5. *Ветров Ю.В., Давыденко А.С., Смирнов П.Л., Соломатин А.И., Терентьев А.В., Царик И.В., Царик О.В., Шепилов А.М. Способ и устройство определения угловой ориентации летательных аппаратов / Патент РФ №2374659. Оpubл. 2009.*

6. *Давыденко А.С., Куликов М.В., Митянин А.Г., Смирнов П.Л., Терентьев А.В., Царик И.В., Царик О.В., Шепилов А.М., Шишков А.Я. Способ и устройство определения угловой ориентации летательных аппаратов/ Патент РФ № 2514197. Оpubл. 2014.*

7. *Гетманцев А.А., Давыденко А.С., Смирнов П.Л., Терентьев А.В., Царик О.В., Шепилов А.М., Щербинина Е.А. Способ и устройство определения угловой ориентации летательных аппаратов/ Патент РФ № 2553270. Оpubл. 2015*

8. *Вишняков С.М., Давыденко А.С., Митянин А.Г., Смирнов П.Л., Терентьев А.В., Царик И.В., Царик О.В., Шепилов А.М., Шишков А.Я. Способ и устройство определения координат объектов / Патент РФ №2513900. Оpubл. 2014.*

Остальные публикации по теме диссертации

9. *Ветров Ю.В., Давыденко А.С. Анализ влияния канального шума на определение пространственной ориентации объекта при использовании спутниковых навигационных систем. // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / науч. ред. Г.Я. Шайдуров; отв. за вып. А.А. Левицкий. -Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012.*

10. *Давыденко А.С., Макаров С.Б. Вероятность ложного решения при определении пространственного положения объекта методом эталонной разности фаз. // Неделя науки СПбПУ материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады. Ответственные редакторы: В.Э. Гасумянц, Д.Д. Каров. 2016. С. 149-153.*

11. *Давыденко А.С., Макаров С.Б. Вероятностные характеристики определения пространственного положения при помощи метода эталонной разности фаз. // Неделя науки СПбПУ материалы научного форума с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций; В.Э. Гасумянц, Д.Д. Каров - ответственные редакторы. 2015. С. 57-60.*