

Бессонов Роман Валерьевич

**Разработка и исследование интегрированного датчика
ориентации космического аппарата**

**Специальность 01.04.01 – приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук**



Москва, 2008

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор Аванесов Г.А.

Официальные оппоненты:

д.ф-м.н. Бранец В.Н.

к.т.н. Мирошник О.М.

Ведущее предприятие ФГУП ГНПЦ “ЦСКБ-ПРОГРЕСС” (г. Самара)

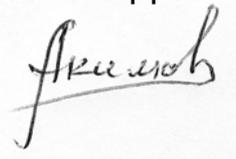
Защита диссертации состоится « » апреля 2008 года в __ часов на заседании диссертационного совета Д.002.113.01 в Институте космических исследований по адресу 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, 2-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН

Автореферат разослан « » февраля 2008 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.113.01

к.ф.-м.н.



Акимов В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Классическая схема построения современной системы управления параметрами углового движения космического аппарата (КА) предполагает использование высокоточных гироскопов, периодически корректируемых по показаниям оптикоэлектронных приборов. При этом, в целях увеличения интервалов между астрокоррекциями, разработчики систем стремились свести к минимуму дрейфы гироскопов. В результате, мировая практика создала многочисленное семейство гироскопических приборов, различного класса точности, отличающихся друг от друга принципами построения, габаритами, энергопотреблением и, что весьма важно, стоимостью.

В то же время в космической технике дальнейшее развитие получили оптические датчики астроориентации. Если в прошлом каждая астрокоррекция требовала прервать плановую работу КА, то оптикоэлектронные астродатчики последнего десятилетия предоставляют возможность измерить параметры астроориентации практически в любой момент времени по изображениям звезд произвольного участка небесной сферы.

С учетом успехов в развитии оптических датчиков ориентации можно оптимизировать режим работы системы управления астроориентацией КА, снизив требования к дрейфам гироскопа до разумного минимума и сделав режим астрокоррекции практически непрерывным. С таким предложением выступил в 2002 г ИКИ РАН. Предложение было поддержано ЦСКБ “Прогресс” и реализовано в качестве резервного режима ориентации на КА “Космос-2410”, “Космос-2420”, “Космос-2427” и “Ресурс-ДК”. Полученные при этом результаты полностью оправдали ожидания.

На перечисленных КА резервный режим ориентации был реализован на основе имеющихся на борту средств: блоков определения координат звезд БОКЗ-М, разработанных ИКИ РАН, и электромеханических датчиков угловых скоростей под управлением бортовой вычислительной машины. Однако разделение функции определения углового положения КА между этими тремя приборами нельзя считать рациональным. Вся задача может быть решена в рамках одного интегрированного прибора, представляющего собой датчик звездной ориентации с встроенным в него датчиком угловой

скорости средней точности. При этом может быть достигнуто оптимальное соотношение аппаратно-программных средств и выигрыш в точности, по массе, энергопотреблению и, в конечном счете, по стоимости.

Малые габариты интегрированных приборов позволяют создавать недорогие испытательные стенды, моделирующие внешние для прибора условия на всех этапах космического полета. Такая комплексная отработка позволяет исключить ошибки алгоритмического и программного обеспечения приборов, и тем самым повысить их надежность.

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию интегрированных приборов ориентации КА, основанных на звездных координаторах семейства БОКЗ и малогабаритных датчиках угловой скорости различной точности, а также их испытательной базе. В связи с тем, что существенными показателями приборов космического применения является масса, габариты, энергопотребление, надежность и стоимость, данная работа актуальна.

Предмет исследования

Предметом исследования являются командно-измерительные приборы системы ориентации КА – звездные координаторы (ЗК) и гироскопические приборы, а также их испытательная база.

Цели и задачи исследования

Цель исследования разработка интегрированных приборов, где в едином конструктиве аппаратно и программно объединяются звездный координатор и датчики угловой скорости.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи.

1. Анализ и выбор оптимальных схем функционирования звездных координаторов совместно с датчиками угловой скорости различной точности.
2. Анализ современного состояния и тенденций развития датчиков угловой скорости. Определение требований к датчикам угловой скорости, входящим в состав интегрированного прибора.
3. Анализ факторов, определяющих показатели точности, частоты обновления информации и диапазона рабочей угловой скорости звездных координаторов семейства БОКЗ.
4. Разработка методик и средств исследования и калибровки датчиков угловой скорости в составе звездного координатора.

5. Разработка и исследование трехосного поворотного стенда, предназначенного для исследования и отработки интегрированных приборов ориентации КА. Разработка методик точностной калибровки стенда.
6. Разработка и анализ алгоритмов функционирования интегрированных приборов, основанных на различных модификациях звездных координаторов БОКЗ и датчиках угловой скорости. Исследование показателей точности и быстродействия интегрированных приборов, реализующих эти алгоритмы.
7. Аппаратная и программная реализация этих алгоритмов и построение интегрированных приборов БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60 с встроенными датчиками угловых скоростей, выполненными по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Научная новизна заключается в том, что:

1. Предложен и сформулирован интеграционный подход развития приборов ориентации КА, основанный на совмещении в едином конструктиве звездного координатора с гироскопическим прибором, позволяющий существенно улучшить показатели по массе, габаритам, энергопотреблению, точности и надежности. Доказана возможность технической реализации этого подхода и его целесообразность.
2. Разработан комплекс методик и средств, достаточный для встраивания датчиков угловой скорости в состав звездного координатора, а также их исследования, калибровки и отработки.
3. Разработан трехосный поворотный стенд, способный обеспечить отработку функционирования интегрированного прибора на всех этапах космического полета, исключить ошибки его программно-алгоритмического обеспечения и тем самым повысить надежность.
4. Разработаны полностью интегрированные приборы, способные определять параметры ориентации и угловой скорости КА на всех участках космического полета. Эти приборы основаны на звездных координаторах БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60 и датчиках угловой скорости, выполненных по технологии МЭМС.

Практическая значимость заключается в следующем: использование разработанных приборов существенно снижает массу, габариты, энергопотребление и стоимость командно-измерительных приборов систем ориентации КА. Уровень миниатюризации и

интеграции этих приборов позволяет использовать недорогие средства комплексной наземной отработки их функционирования, моделируя условия на всех этапах космического полета. Такая наземная отработка позволяет исключить ошибки программного обеспечения прибора и повысить его надежность.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ современного состояния и перспектив развития приборов определения ориентации КА, а также систем управления угловым движением на их основе.
2. Обоснование перспективности интеграционного подхода в развитии космических навигационных приборов.
3. Разработка методик и средств, позволяющих встраивать датчики угловой скорости в звездный координатор, а также проводить их исследование, калибровку и отработку.
4. Разработка трехосного поворотного стенда и методики его точностной калибровки с использованием звездного координатора. Применение стенда в целях исследования и отработки функционирования интегрированных приборов.
5. Разработка алгоритмов функционирования интегрированного прибора и их аппаратная реализация в приборах БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60.

Апробация работы

Выполненные и представленные в диссертации исследования и разработки получили положительную оценку на предприятиях космической отрасли - ЦСКБ "Прогресс", НПО им. Лавочкина, РКК "Энергия", НПП ВНИИЭМ - и использованы при создании интегрированных приборов ориентации КА на базе звездных координаторов БОКЗ.

Результаты работы были изложены на международной научно-технической конференции "Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий", 5-ой международной конференции "Авиация и космонавтика 2006", "XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам" и опубликованы в статье журнала "Авиакосмическое приборостроение".

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 56 наименований. Общий объем работы составляет 162 страницы. Работа содержит 108 рисунков и 42 таблицы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы, раскрыты научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе кратко изложены основные задачи, решаемые системой ориентации, ее структура и состав. На основе анализа функционирования систем ориентации КА различного назначения сформулированы требования к бортовым приборам измерения параметров углового движения (табл. 1).

Таблица. 1. Требования к командно-измерительным приборам систем ориентации различных КА.

Параметры измерительного комплекса систем ориентации КА	Низкоорбитальные спутники ДЗЗ среднего и низкого разрешения	Низкоорбитальные спутники ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения	Высокоорбитальные спутники глобальной навигации и связи
Точность определения ориентации	10-20 "	1-10 "	1-3 '
Допустимая угловая скорость, град/с	до 2-3	До 4-8	до 1
Частота обновления информации об ориентации, Гц	1-10	1-10	Около 1

К таким приборам относятся гироскопы, звездные координаторы, солнечные датчики, датчики горизонта и магнитометры. Каждый из этих приборов обладает своими характерными особенностями, определяющими их использование в системах ориентации КА различного назначения. Анализ современных систем ориентации показывает, что наибольшее распространение получили системы, основанные на сочетании гироскопов и звездных координаторов.

Важнейшим свойством гироскопов является их высокая помехозащищенность и способность непрерывно определять параметры движения КА независимо от факторов космического пространства. Тенденции развития гироскопии привели к созданию многочисленного семейства устройств, отличающихся друг от друга принципами построения, габаритами, энергопотреблением и, что весьма важно, стоимостью.

Многолетний опыт космических полетов показывает, что коррекция дрейфов гироскопов с достаточной точностью может быть произведена только по показаниям бортовых оптикоэлектронных датчиков, сводные данные о которых приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, максимальная точность определения параметров ориентации достигается благодаря применению звездных координаторов. Опыт эксплуатации приборов звездной ориентации семейства БОКЗ, созданных в ИКИ РАН, а также приборов зарубежных производителей показал их высокую надежность и помехозащищенность.

Таблица. 2. Параметры приборов ориентации КА.

	Звездный координатор	Солнечный датчик	Датчик местной вертикали
Точность (3σ)	1-15''	1-5'	1-6'
Количество чувствительных осей,	3	2	2
Масса, кг	2-4	0.5-0.8 кг	2-4 кг
Энергопотребление, Вт	6-12	3-6	10
Частота выдачи информации об ориентации, Гц	1-10	5-20	0,2-20
Допустимая угловая скорость, град/с	1-2,5	5-10	5-10

Традиционный путь развития звездных координаторов в ИКИ РАН уже привел к созданию приборов БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60, достаточных для прямого управления КА по их показаниям в штатном режиме эксплуатации. Частота обновления информации об ориентации в этих приборах составляет 4 Гц, а диапазон рабочей угловой скорости доходит до 2,5 град/с. В ряде зарубежных аналогов достигнуты еще более высокие показатели по быстродействию (10 град/с, 10 Гц), удовлетворяющие требованиям всех типов КА.

В качестве аргумента против использования звездных координаторов на борту без поддержки другими измерительными устройствами выступают нештатные ситуации, возникающие вследствие засветки поля зрения прибора ярким небесным объектом, таким как Солнце и Земля, или превышение допустимой для прибора угловой скорости КА. Однако анализ таких ситуаций показывает, что они весьма редки и имеют незначительную продолжительность, что позволяет использовать гироскопы относительно низкой точности для определения параметров углового движения КА в такие периоды времени.

Анализ систем ориентации российских и зарубежных КА, основанных на сочетании гироскопических приборов и звездных координаторов, позволяет сделать ряд выводов. Во-первых, видна тенденция к перераспределению функций между звездным координатором и гироскопом. Если раньше хранение параметров ориентации возлагалось на высокоточные гироскопы, изредка корректируемые по показаниям звездных координаторов, то теперь оптикоэлектронные приборы эксплуатируются в непрерывном режиме, а гироскопы используются для их поддержки.

В последних российских КА, таких как “Ресурс-ДК”, “Космос-2410”, “Космос-2420”, “Космос-2427”, звездные координаторы уже работают в контуре управления движением совместно с гироскопами средней точности. В то же время на КА связи “Ямал-100” и “Ямал-200” обеспечение непрерывной орбитальной ориентации осуществляется только с использованием звездных координаторов БОКЗ и БОКЗ-У.

Во-вторых, видно, что точностные и динамические характеристики систем ориентации КА не ухудшаются при переходе от использования редко корректируемых высокоточных гироскопов к использованию малогабаритных гироскопов среднего класса точности при их квазинепрерывной астрокоррекции. Это подтверждается практикой работы КА ДЗЗ высокого разрешения “Ресурс-ДК”.

В-третьих, взаимодействие гироскопов и звездных координаторов на КА “Ресурс-ДК”, “Космос-2410”, “Космос-2420”, “Космос-2427” осуществляется через бортовую вычислительную машину (БВМ). Она решает задачи астрокоррекции гироскопов и формирования априорной информации об ориентации для быстрого восстановления работоспособности звездного координатора после его засветки.

Гораздо рациональнее организовать постоянную взаимную поддержку двух источников информации внутри одного

интегрированного прибора. На основе анализа современного состояния и перспектив развития гироскопов и звездных приборов показано, что такая интеграция технически возможна при использовании твердотельных волновых гироскопов, волоконно-оптических гироскопов и микромеханических гироскопов. Она позволяет оптимизировать аппаратные и программные средства, что ведет к снижению массы, габаритов и энергопотребления командно-измерительного комплекса системы ориентации.

Во второй главе, основываясь на анализе российских и зарубежных звездных координаторов, а также тенденции их совершенствования, показано, что приоритетным направлением развития приборов является повышение частоты обновления информации об ориентации и расширение диапазона рабочей угловой скорости при сохранении точностных характеристик (рис. 1). Одновременно с этим будут улучшаться такие характеристики приборов как помехозащищенность, надежность функционирования, радиационная стойкость и габаритно-массовые показатели.

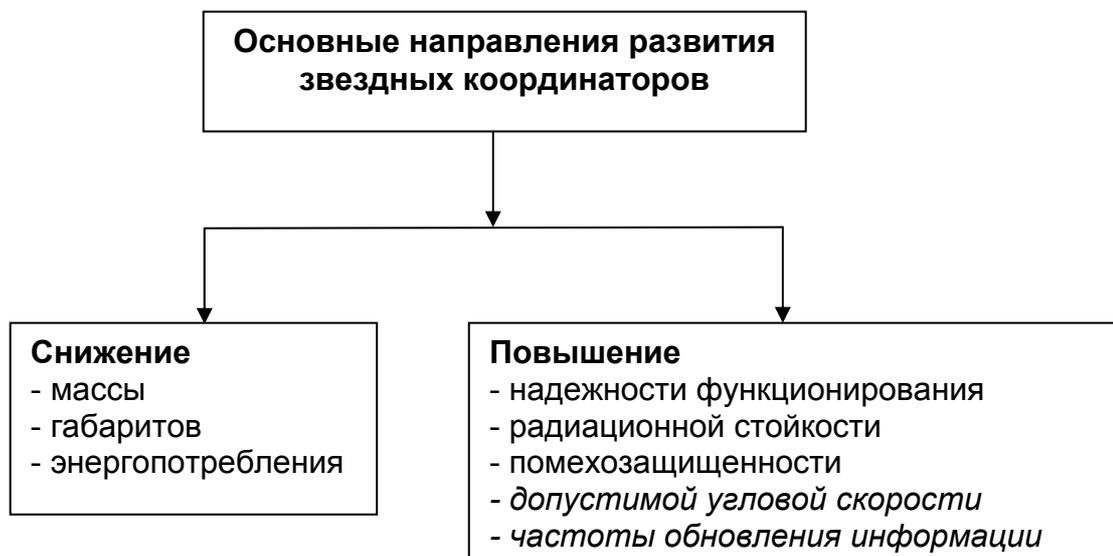


Рис. 1. Основные направления развития звездных координаторов.

Достижение успеха в перечисленных направлениях напрямую связано с появлением все более совершенных чувствительных элементов и процессоров, а также эффективных блендов, позволяющих использовать светосильные объективы. Более того, в следующих поколениях российских звездных координаторов планируется

достигнуть показателей быстродействия, перекрывающих требования всех типов КА.

Доказательство всего перечисленного строится на основе математического моделирования работы звездных приборов БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60. Точность и быстродействие звездных координаторов во многом зависят от процедуры определения направления на одиночную звезду, для чего проводится анализ выполнения этой процедуры в приборах БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60. Для этого моделируются изображения звезд различной величины на ПЗС-матрице приборов при учете собственных шумов видеотракта, фотонных шумов от Солнца и самих звезд, а также угловой скорости КА. Моделирование шумов выполняется на основе псевдослучайных разыгрываний значений различных случайных величин методом Монте-Карло. В результате этого исследования получены оценки точности определения параметров трехосной ориентации в зависимости от параметров объектива и чувствительного элемента, коэффициента подавления боковой засветки блендой, шумов видеотракта, времени экспонирования и угловой скорости КА.

Кроме того, показано, что такой расчет хорошо сходится с экспериментом и может использоваться как для прогнозирования показателей вновь разрабатываемых приборов, так и для исследования существующих. В результате расчета показано, что построение эффективной однокаскадной бленды и использование радиационно стойкого чувствительного элемента с разрешением 1000x1000 в следующих поколениях приборов семейства БОКЗ позволит достичь частоты обновления информации 10 Гц и диапазона рабочей угловой скорости 10 град/с. Такие чувствительные элементы существуют, а новая бленда находится на стадии конструирования.

Другим результатом проведенного исследования является полученная расчетным путем зависимость точности определения параметров ориентации приборами БОКЗ-МФ и БОКЗ-М от величины угловой скорости.

В заключение этой главы следует вывод, что традиционный путь развития звездных координаторов позволяет повысить быстродействие до уровня, требуемого для прямого управления КА любого назначения. Однако такое развитие не устраняет недостатка, связанного с возможностью возникновения временных засветок приборов. Поэтому перспективно встраивание малогабаритных датчиков угловой скорости в состав звездного координатора.

В третьей главе

Один из способов встраивания датчиков угловой скорости в звездный координатор - использование аналого-цифрового преобразования сигналов с датчиков и передача их в процессор звездного координатора. Учитывая успехи современной микроэлектроники, такой способ довольно прост в реализации и требует введения минимального количества дополнительных элементов в звездный координатор, а именно датчиков угловой скорости и АЦП. Поэтому интегрированный прибор выигрывает в надежности, энергопотреблении и габаритно-массовых показателях по сравнению с конструктивно разделенным звездным координатором и гироскопическим прибором.

Такая схема имеет также свои недостатки – аналого-цифровое преобразование искажает сигнал с датчиков угловой скорости, что приводит к дополнительным ошибкам при интегрировании кинематических уравнений. Анализ этих ошибок показывает, что для приведения величины ошибок дискретизации к уровню 10-20% от величины собственных ошибок датчиков угловой скорости (ARW) нужно выполнять следующие рекомендации. При построении схемы согласования сигналов с датчиков угловой скорости и вычислительного ядра необходимо добиваться, чтобы один разряд АЦП был в несколько раз меньше с.к.о. входного сигнала. Такие рекомендации были учтены при встраивании датчиков угловой скорости в звездный координатор БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60.

Для определения параметров углового движения по показаниям датчиков угловой скорости используют математическую модель датчиков. Параметрами модели обычно выступают смещение нуля и масштабный коэффициент датчиков, а также функции систематического изменения этих величин от температуры (термокомпенсационная функция), линейного ускорения или значения самой угловой скорости (нелинейность). Кроме того, требуется определить направление чувствительных осей датчиков в системе координат звездного координатора.

В данной работе представлен комплекс методик и средств, позволяющих определять параметры модели датчиков угловой скорости внутри звездного координатора. Эти методики и средства были апробированы при создании звездных координаторов БОКЗ-МФ и БОКЗ-60, в состав которых включены низкоточные датчики угловой скорости, выполненные по технологии МЭМС.

Основным инструментом исследования, калибровки и отработки датчиков угловой скорости в составе интегрированного прибора выступает трехосный поворотный стенд, разработанный в рамках данной работы. Перед началом его разработки были сформулированы требования к стенду и произведен анализ аналогичных устройств, который показал, что гораздо дешевле изготавливать стенд из трех одноосных поворотных платформ.

Выбранные одноосные поворотные платформы имеют обратную связь и позволяют определять свой угловой поворот с достаточно высокой точностью. Программное обеспечение поворотного стенда, реализованное в управляющем компьютере, позволяет определять ориентацию системы координат испытуемого прибора в инерциальном пространстве. Для повышения точности определения этой ориентации разработаны методики, позволяющие калибровать поворотный стенд с помощью гониометра и звездного координатора (рис. 2), работающего с изображениями реального звездного неба.

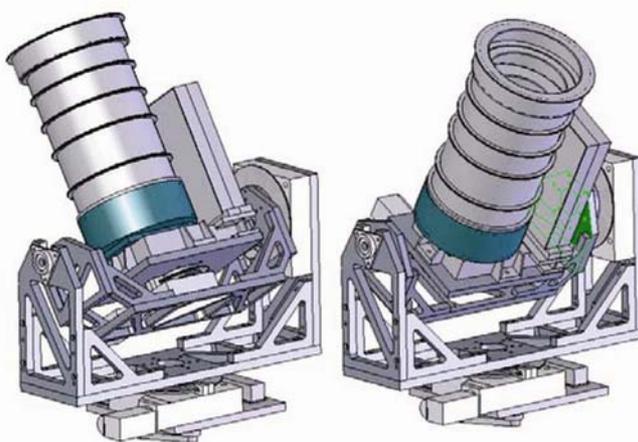


Рис. 2. Динамическая часть стенда с установленным на нее звездным координатором БОКЗ-М60.

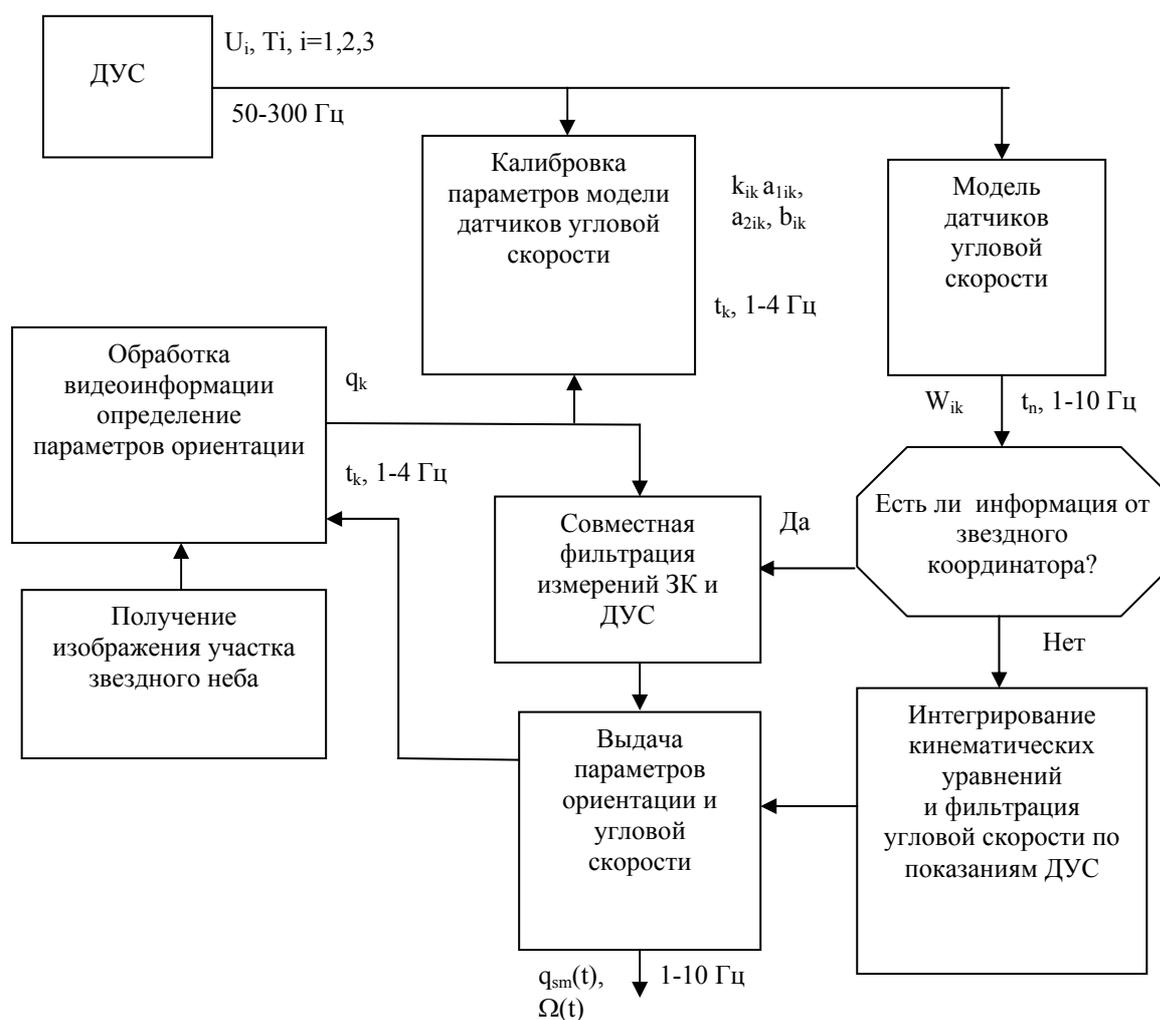
Этот стенд имеет возможность работы как в лабораторных, так и в полевых условиях. При работе в полевых условиях на стенд устанавливается интегрированный прибор, звездный координатор которого определяет ориентацию датчиков угловой скорости в инерциальном пространстве по реальному звездному небу. Осуществляя запрограммированные повороты, стенд позволяет исследовать, калибровать и отрабатывать функционирование интегрированного прибора. Следует заметить, что предложенный

способ точностной калибровки датчиков угловой скорости в интегрированном приборе значительно дешевле использования традиционных стендов.

При работе на стенде в лабораторных условиях к динамической части стенда добавляется оптическая. Она устанавливается на бленду звездного координатора интегрированного прибора, так что может двигаться вместе с ним на поворотной части стенда. Оптическая часть стенда состоит из коллиматора и мини-дисплея, позволяющих воспроизводить изображение участка звездного неба, которое регистрируется звездным координатором интегрированного прибора. Отображаемый участок звездного неба перемещается в соответствии с движением поворотной части стенда.

Программное обеспечение, формирующее изображение участков звездного неба, уже давно отлажено на существующем в ИКИ РАН оптическом стенде отработки и калибровки звездных координаторов. Оно позволяет моделировать функционирование звездного координатора при таких помехах как заряженные частицы и фоновая засветка, а также движение КА. При совмещении оптической части с поворотной платформой такую возможность получает и интегрированный прибор. Успешный опыт использования существующего стенда в ИКИ РАН показывает, что отработка на нем приборов серии БОКЗ позволяет исключить ошибки их программного обеспечения и повысить надежность функционирования.

В четвертой главе представлена функциональная схема алгоритма работы интегрированного прибора (рис. 3). Программно-алгоритмическое обеспечение прибора выполняет процедуры расчета параметров ориентации по показаниям звездного координатора и вектора угловой скорости по показаниям датчиков угловой скорости. После этого вычисленные данные используются для взаимной поддержки звездного координатора и датчиков угловой скорости, и вычисления параметров ориентации КА.



U_i, T_i – сигналы угловой скорости и температуры с i -го датчика угловой скорости;
 q_k – кватернион ориентации, вычисленный по показаниям звездного координатора в момент времени t_k ;
 $k_{ik}, b_{ik}, a_{1ik}, a_{2ik}$ – масштабный коэффициент, смещение нуля и коэффициенты термокомпенсационной функции i -го датчика угловой скорости, вычисленные в момент времени t_k ;
 W_{ik} – проекции вектора угловой скорости на оси приборной системы координат;
 q_{sm}, Ω – кватернион ориентации и вектор угловой скорости, полученные в результате фильтрации.

Рис. 3. Функциональная схема алгоритма работы интегрированного прибора.

Анализ функционирования звездных координаторов семейства БОКЗ в различных режимах показал, что надежность и время решения задачи определения ориентации прибором напрямую связаны с априорной информацией. В интегрированном приборе такая информация поступает от датчиков угловой скорости и используется

для “подсказки” звездному координатору при возникновении значительного углового ускорения КА или при засветке поля зрения прибора Солнцем или Землей. Такая функция реализована в программном обеспечении приборов БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60.

Другая процедура программного обеспечения выполняет квазинепрерывную калибровку параметров модели датчиков угловой скорости. В работе разработан алгоритм, автоматически калибрующий смещение нуля датчиков, их масштабный коэффициент и термокомпенсационную функцию. Как показал эксперимент с датчиками угловой скорости, изготовленными по технологии МЭМС, эти параметры модели могут меняться во времени вследствие воздействия ионизирующего излучения. Как показали эксперименты, такая калибровка существенно увеличивает точность оценивания параметров углового движения по показаниям датчиков угловой скорости.

Другая функция программного обеспечения интегрированных приборов производит совместную адаптивную фильтрацию показаний звездного координатора и датчиков угловой скорости с учетом кинематики КА. При этом увеличивается точность оценивания параметров углового движения КА по сравнению с “сырыми” измерениями приборов.

В данной работе приведены оценки точности (полученные расчетным путем) определения вращательного движения при фильтрации показаний звездных координаторов БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60 и датчиков угловой скорости различных производителей средней и низкой точности (ТВГ, ВОГ, ММГ).

При засветке поля зрения интегрированного прибора или превышения угловой скорости КА допустимой для звездного координатора величины, параметры ориентации вычисляются путем интегрирования кинематических уравнений. Анализ методической ошибки интегрирования кинематических уравнений показывает, что для интегрирования показаний датчиков угловой скорости низкой и средней точности на коротких промежутках времени достаточно использования метода интегрирования 1-го порядка.

При встраивании датчиков угловой скорости, выполненных по технологии МЭМС, в состав звездных координаторов БОКЗ-МФ и БОКЗ-МФ практически не было использовано дополнительных элементов (за исключением самих датчиков), а представленные программные процедуры реализованы в общем процессоре прибора. Масса прибора при этом увеличилась всего на 30 г, а

энергопотребление меньше чем на 0,5 Вт. При этом прибор стал способен решать целевую задачу в диапазоне угловых скоростей до 40 град/с и при засветке поля зрения прибора. Время одного цикла измерений позволяет обновлять параметры ориентации и угловой скорости с частотой 4 Гц, причем на любом участке космического полета.

Полученные в данной работе результаты позволяют встраивать и более высокоточные датчики угловых скоростей в состав звездных координаторов и тем самым создать высокоточный прибор массой до 3 кг достаточный для управления параметрами углового движения любого типа КА.

Заключение

Основные результаты, представленные в диссертации, состоят в следующем:

1. На основе анализа современного состояния и тенденций развития командно-измерительных приборов системы ориентации КА, а также экспериментов проведенных на КА “Космос-2410”, “Космос-2420”, “Космос-2427” и “Ресурс-ДК” показано, что интеграция датчиков угловой скорости, выполненных по технологии ТВГ, ВОГ или МЭМС, в звездный координатор является технически возможной и целесообразной. Интеграция позволяет улучшить многие характеристики системы управления ориентацией КА такие как, масса, габариты, энергопотребление, надежность и стоимость.

2. Разработан комплекс методик и средств, позволяющий встраивать датчики угловой скорости в состав звездного координатора семейства БОКЗ и проводить их исследование, калибровку и отработку.

3. Разработан трехосный стенд, позволяющий проводить отработку функционирования интегрированного прибора, моделируя внешние для прибора условия на всех этапах космического полета. Такая отработка предоставляет возможность исправить ошибки программно-алгоритмического обеспечения прибора, и тем самым повысить его надежность.

4. Проведенный анализ алгоритмов функционирования интегрированного прибора показал, что совместная обработка информации от двух взаимодополняющих источников информации позволяет существенно повысить точность определения параметров ориентации и угловой скорости КА, а также повысить надежность и

быстродействие приборов. Показано, что такие алгоритмы реализуются в одном процессоре прибора семейства БОКЗ.

5. Изложенные выше результаты апробированы при создании первых в России интегрированных приборов ориентации КА, представляющих собой звездные координаторы БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60 со встроенными датчиками угловых скоростей низкой точности, выполненными по технологии МЭМС. Эти приборы способны обеспечить прямое управление КА на всех этапах космического полета.

Работы, опубликованные по теме диссертации

1. Разработка и исследование характеристик трехосного блока определения угловых скоростей на основе технологии МЭМС. /Р. В. Бессонов, С. В. Дятлов, А. А. Крупин, М. И. Куделин //Авиакосмическое приборостроение. М.: 2007. № 9. С. 16.
2. Звездный координатор БОКЗ-М и перспективы его развития. /Аванесов Г.А., Форш А.А., Бессонов Р.В., Зиман Я.Л., Куделин М.И., Залялова Р.Г. //Интегрированные навигационные системы. Материалы XIV Санкт-Петербургской международной конференции, 28-30 мая 2007. СПб.: Государственный научный центр Российской Федерации ЦНИИ “Электроприбор”. 2007. С. 199.
3. Integrated Instruments for Spacecraft Autonomous Navigation. /G.A. Avanesov, R.V. Bessonov, Ya.L. Ziman, M.I. Kudelin, A.A. Forsh. //7-th International Symposium Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operation, Moscow, 11-15 June, 2007.
4. Бессонов Р.В. Комплексование приборов астроориентации совместно с низкоточными датчиками угловой скорости и аппаратурой спутниковой навигации //Тезисы докладов 5-ой международной конференция “Авиация и космонавтика 2006”, Москва, 23-26 октября 2006. М.: Изд-во МАИ, 2006. С. 269.
5. Бессонов Р.В. Разработка автономного прибора угловой ориентации на основе звездных датчиков и низкоточных датчиков угловой скорости //Тезисы докладов научно-технической конференции ФГУП “РНИИ КП”, посвященной 60 - летию предприятия, Москва, 10-12 октября, 2006. М.: ФГУП “РНИИ КП”. 2006. С. 138.
6. Бессонов Р.В. Комплексование навигационной аппаратуры как путь развития системы управления космического аппарата //Тезисы докладов Международной научно-технической конференция

- “Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий в инновационных проектах”, Сочи, 2-13 октября 2006. М.: Радио и связь. 2006.
7. Интегрирование командных приборов как путь оптимизации системы управления движением КА. /Аванесов. Бессонов Р.В. Карелов А.И. //Материалы выездного семинара “Космическое приборостроение”, Россия, Таруса, 7-9 июня 2006. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 43.
 8. Комплексование навигационной аппаратуры КА с целью повышения ее автономности, надежности и помехозащищенности. /Бессонов Р.В., Карелов А.И. //Тезисы докладов конференции молодых ученых, посвященная дню космонавтики “Фундаментальные и прикладные космические исследования”, 12 апреля 2006, М.: ИКИ РАН. 2006. С. 42.
 9. Перспективы развития приборов космической ориентации. Бессонов Р.В. Материалы X международной конференции и V Российской научной школы, Сочи, 2-13 октября 2005. М.: Радио и связь. 2006.
 10. Интегрирование низкоточных датчиков угловых скоростей в приборе астроориентации. /Бессонов Р.В., Карелов А.И. //Тезисы докладов конференции молодых ученых, посвященная дню космонавтики “Фундаментальные и прикладные космические исследования”, 12 апреля 2005. М.: ИКИ РАН. 2006. С. 35.