

В.Е. Набивач**ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ:
ЗВЕЗДНЫЙ ДАТЧИК — ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ**

Рассмотрена задача повышения надежности звездного датчика ориентации, который функционирует в условиях с существенной неопределенностью и относится к средствам космической техники критического назначения. Представлена интерпретация задачи повышения надежности с применением теории катастроф и управления рисками. Обоснована необходимость создания инвариантных многоканальных интегрированных приборов ориентации, содержащих полнофункциональные каналы ориентации, основанные на разных физических принципах.

Введение

При рассмотрении проблемы создания конкурентоспособных образцов датчиков астроориентации (звездных датчиков (ЗД) ориентации) космических аппаратов (КА) существенную роль играет проблема повышения надежности их функционирования.

ЗД используются в системах управления КА и для космических систем являются устройствами критического назначения [1]. Это определяется тем, что отказ функционирования ЗД может привести к потере функциональных характеристик КА, а порой и всей с ним связанной миссии. Поэтому для повышения надежности функционирования на КА устанавливается несколько ЗД, причем они могут использоваться синхронно или асинхронно, в режиме «горячего» или «холодного» резервирования. У мировых лидеров в области создания и производства ЗД наметилась тенденция создания нескольких каналов получения первичной информации [2–5].

Приборы серии «БОКЗ — Блок определения координат звезд» (Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)) достаточно удачно эксплуатируются в Российской Федерации. Они предназначены для высокоточного определения в реальном времени параметров трехосной ориентации по изображениям сегментов звездного неба. Прибор «БОКЗ-М» используется в качестве астрокорректора гироскопических датчиков угловых скоростей, работающих в реальном времени. Поэтому требования по точности к ЗД предъявляются все более жесткие. Так, для координатной привязки элемента съемочной системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого пространственного разрешения требуется точность определения ориентации порядка долей угловой секунды [2].

Прибор «БОКЗ-М» имеет точность углового позиционирования оси Z — 1,5 угл. с при измерении параметров вращения вокруг осей X, Y. При измерении параметров вращения вокруг оси Z точность определения угла составляет 15 угл. с.

Для повышения точности определения ориентации в ИКИ РАН предложено использовать синхронно работающие приборы. Проведены серии экспериментов по совместной работе двух ЗД с минутным и трехсекундным интервалом выдачи данных. На основе этих экспериментов в отделе оптико-

физических исследований ИКИ РАН [2] реализован алгоритм равноточного определения трехосной ориентации до 1,5 угл. с по каждой из координат.

Приборы SED-16/26 [3] фирмы Sodern (Франция) — это полностью автономные трехосные универсальные приборы для определения ориентации по изображениям звезд. Эти ЗД предназначены для управления ориентацией КА в космическом пространстве на низких, средних и геостационарных орбитах или в дальнем космосе. Перспективная разработка фирмы Sodern [4] — HYDRA Star Tracker — представляет собой интегрированный прибор, состоящий из трех оптических каналов регистрации первичной информации, использующих в качестве чувствительных элементов активные пиксели (Active Pixel Sensor). Обработка информации сконцентрирована в отдельном блоке электроники.

Сейчас в космическом приборостроении наблюдается тенденция к комплексированию функционально близких приборов. В ИКИ РАН создан звездный координатор, сочетающий ЗД ориентации и гироскоп. Эта связь двух приборов удачно взаимодополняет их, увеличивая надежность выполнения целевого задания. В настоящее время в ИКИ РАН разрабатывается интегрированный прибор, который сочетает ЗД ориентации, гироскоп средней точности и устройство спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS. Предполагается, что этот прибор будет полностью удовлетворять требованиям КА ДЗЗ по точности ориентации. Отметим, что приборы спутниковой навигации, например ГЛОНАСС/GPS, также интегрированы по источникам первичной информации. Кроме того, в приборы спутниковой навигации предполагается интеграция и третьего источника первичной информации — Европейской системы спутниковой навигации Galileo.

Снижение риска отказа — путь повышения надежности приборов критического назначения.

1. Постановка задачи. Принципы управления рисками

Теорию катастроф следует рассматривать как прикладной аспект теории особенностей гладких отображений [6–11]. Она представляет собой теорию устойчивости особых точек динамических систем, поведение которых определяется семействами гладких потенциальных функций $P(x_i, C_m)$.

Особенностью в теории катастроф является резкое, скачкообразное изменение состояния сложной системы при непрерывном изменении ее параметров, что и используется при моделировании соответствующих явлений.

В работе фатальным отказом (особенностью — катастрофой) будем называть полную (невосстанавливаемую) потерю работоспособности приборов и устройств критического назначения в рассматриваемом случае ЗД.

Широкое приложение методов теории катастроф началось после выхода в свет книги одного из создателей этой теории — Рене Тома [9], где теория катастроф применялась для изучения теории морфогенеза (формообразования) в биологии.

В дальнейшем методы теории катастроф использовались для моделирования скачкообразных процессов в физике (механике и оптике), биофизике, биологии, психологии, общественных науках [7–11].

Скачкообразные процессы часто сопряжены с действительно катастрофическими явлениями. Возникающее новое положение равновесия во многих случаях является нежелательным, связано с разрушением конструкции или сис-

темы, а в отдельных случаях — с утратой функциональности и другими последствиями. Это остойчивость судов, прощелкивание упругой балки, пробой электроизоляции, гидродинамические неустойчивости в механике жидкости, дифференциация клеток в биологии развития и т.д. Исходя из этого, есть все предпосылки связать задачи управления рисками с приложениями теории катастроф.

2. Математическая основа и основные закономерности

Катастрофическое поведение внутренне присуще большинству сложных систем. Для них характерны общие закономерности, которые могут быть выявлены на основе нелинейной динамики и системного анализа.

Устойчивость — фундаментальное понятие, которое характеризует одну из важнейших черт поведения сложных систем. Оно применяется для описания постоянства состояния системы, последовательности состояний, в которых оказывается система, постоянства структуры и функционирования системы.

Строгое определение устойчивости, получившее широкую известность, ввел А.М. Ляпунов [12].

Бифуркация — изменение числа решений или потеря их устойчивости для уравнений определенного типа. В прикладном плане этим термином обозначают поворотные пункты развития, потерю устойчивости предшествующего состояния, подчеркивая ситуацию выбора, возможность нескольких вариантов дальнейшего хода событий.

Понятие бифуркации, родившееся в математике, сейчас широко используют в технике и естественных науках, физике, химии, биологии, кибернетике и теории управления, экономике, политологии, психологии и социологии, других отраслях знаний.

Рассмотрим признаки бифуркации, признаки риска.

— *Чувствительность системы.* Малые воздействия вблизи точки бифуркации приводят к качественно (кардинально) различным сценариям возможного поведения системы. (Рождение риска — малые причины могут вызывать большие последствия — система становится предельно уязвимой).

— *Неустойчивость предшествующего устойчивого состояния.* При непрерывном изменении параметров происходит потеря свойства устойчивости предшествующего состояния равновесия сложной системы. Если в качестве параметра системы выступает время, то принцип «завтра будет примерно так же, как и сегодня» не работает. Будущие устойчивые состояния системы будут отличаться от предшествующего состояния — локально необратимые последствия изменения параметров системы.

— *Потеря или угроза (риск) потери непрерывности движения сложной системы.* Эволюция системы может развиваться скачком, сохраняя свойство непрерывности развития. Возможность прохождения в непрерывной системе дискретных изменений (катастрофических скачков) — реализация конечного отклика при бесконечно малых воздействиях на сложную систему.

Риск — наличие потенциально опасных факторов (значений изменяемых параметров системы), которые могут привести к необратимым последствиям (возникновению нескольких новых локально устойчивых положений равновесия).

Значение элементарной теории катастроф Р. Тома состоит в том, что она сводит огромное многообразие ситуаций эволюции динамических систем потенциального типа к небольшому числу стандартных схем (канонических форм), которые можно подробно исследовать раз и навсегда.

Доказано, что для четырехпараметрических семейств динамических систем потенциального типа в общем положении (структурно устойчиво) существует только семь элементарных катастроф [7, 8], семь элементарных катастроф Р. Тома [9], которые имеют канонические деформации (формы), представленные в таблице.

Таблица

№ пп	Название особенности	Коразмерность	Каноническая деформация	Размерность
1	Складка	один	$\text{Cat}(x, c) = x^3 + cx$	один
2	Сборка	два	$\text{Cat}(x, \bar{c}) = x^4 + c_2x^2 + c_1x$	один
3	Ласточкин хвост	три	$\text{Cat}(x, \bar{c}) = x^5 + c_3x^3 + c_2x^2 + c_1x$	один
4	Бабочка	четыре	$\text{Cat}(x, \bar{c}) = x^6 + c_4x^4 + c_3x^3 + c_2x^2 + c_1x$	один
5	Гиперболическая омбилика	три	$\text{Cat}(\bar{x}, \bar{c}) = x_2^3 + x_1^3 + c_1x_1x_2 - c_2x_2 - c_3x_1$	два
6	Эллиптическая омбилика	три	$\text{Cat}(\bar{x}, \bar{c}) = x_2^3 - 3x_2x_1^2 + c_1(x_1^2 + x_2^2) - c_2x_2 - c_3x_1$	два
7	Параболическая омбилика	четыре	$\text{Cat}(\bar{x}, \bar{c}) = x_2^2x_1 + x_1^4 + c_1x_2^2 + c_2x_1^2 - c_3x_2 - c_4x_1$	два

Приведенный перечень семи элементарных катастроф Р. Тома включает все возможные структурно устойчивые особенности, которые могут наблюдаться при воздействии на динамическую систему гладких изменений численных значений от одного до четырех варьируемых параметров.

Классификация особенностей дифференцируемых отображений и ассоциированных с ними динамических систем проведена В.И. Арнольдом [6, 13].

В элементарной теории катастроф рассматривается *частный* случай динамических систем, который предполагает, что для изучаемой системы существует потенциальная функция $P(x_i, C_m)$, например потенциальная энергия механических систем.

3. Задача управления риском отказа устройств критического назначения

Рассмотрим многообразие особенностей коразмерности два «сборка», рис. 1.

В незаштрихованной части плоскости параметров особенности коразмерности два «сборка» имеется одно устойчивое положение равновесия (унимодальная потенциальная функция) — штатный режим функционирования сис-

темы. При возникновении отказа система критического назначения утрачивает работоспособность и скачком переходит в другое устойчивое положение равновесия. Если переход необратим — неустранимый отказ, то новое устойчивое состояние является уже глобальным минимумом — фатальный отказ (риска нет, он реализовался (система снова находится в области унимодальности)).

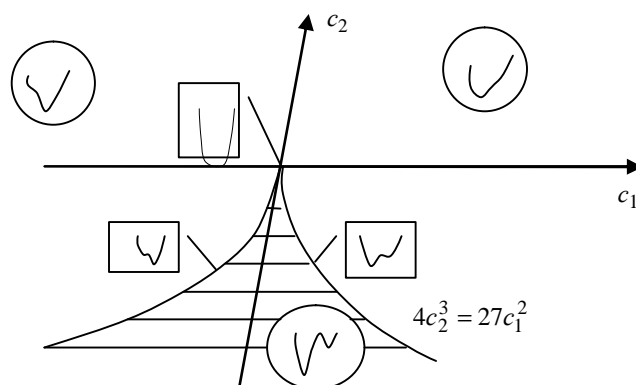


Рис. 1

В заштрихованной части плоскости параметров особенности коразмерности два «сборка» исследуемая система имеет два устойчивых и одно неустойчивое положение равновесия. Возникшее новое устойчивое положение равновесия на первых порах является энергетически невыгодным, но риск его реализации (перехода системы в это положение равновесия), как локального экстремума, уже существует. При дальнейшей эволюции системы в этом направлении критической области параметров новый экстремум потенциальной функции *становится энергетически выгодным*, и система в какой-то момент все же перейдет в него (в новое положение равновесия).

Это может быть восстанавливаемый отказ, если еще остается возможным обратный переход, как в случае действия высокоэнергетических частиц солнечного ветра и космического излучения на ПЗС-матрицы ЗД [14], так и фатальный отказ, когда второе положение равновесия не обеспечивает функциональность устройства критического назначения.

4. Повышение надежности устройств критического назначения (приборов ориентации)

На данный момент других возможностей, кроме как резервирование каналов, не просматривается, но какое резервирование и каких каналов нужно производить? Что в этом случае мы делаем с точки зрения теории катастроф? Мы создаем новое устойчивое положение равновесия (там, где у нас было одно положение равновесия (фатальный отказ системы), теперь их будет больше, причем они должны обеспечивать функционирование системы).

Выше уже указывалось на создание двух (в ИКИ РАН — для выравнивания точностных характеристик) или трех (в HYDRA Star Tracker фирмы Sodern) оптических каналов. Это целесообразно для выравнивания точности, борьбы с «ослеплением» — засветкой чувствительных элементов, повышения быстродействия и для решения других задач ЗД.

Однако наиболее целесообразно, особенно для устройств критического назначения, которые должны надежно функционировать в условиях с существенно неопределенными факторами (орбитальные полеты у Земли, других планет и космических тел, дальнем космосе), следует создавать дополнительные полнофункциональные каналы, которые работают на других физических принципах, например инерциальный канал в ЗД. Исторически так и сложилось: независимо один от другого фирмой Dreger и ИКИ РАН создано два интегрированных прибора, которые объединяют звездный датчик и гироскоп.

В течение нескольких лет [15] в ИКИ РАН ведется работа по созданию интегрированного прибора, сочетающего звездный датчик ориентации и датчики угловой скорости. Создан интегрированный прибор БОКЗ-МФ, в котором использованы датчики угловой скорости (ДУС) ADIS16251 фирмы Analog Devices (США), изготовленные по технологии МикроЭлектроМеханических систем (МЭМС-технологии). Эти датчики имеют уход на уровне 60 град/ч и шум около 3 угл. мин/с. Испытания на стенде в ИКИ РАН и на реальном небе показали значительное преимущество интегрированного прибора по сравнению со звездным датчиком без поддержки инерциальными средствами.

Встроенные датчики угловой скорости позволили прибору грубо определять параметры ориентации при превышении максимальной угловой скорости для оптического канала, а сразу после снижения угловой скорости, при наличии априорной информации, вступать в работу оптическому каналу — восстанавливаемый отказ (инерциальный канал является полнофункциональным каналом с ограниченным временем работоспособности — накопление ошибки).

Следующим шагом развития интегрированных приборов определения ориентации в ИКИ РАН стала модернизация прибора БОКЗ-МФ-01, в который были встроены более точные датчики угловой скорости CRG20-01 фирмы Silicon Sensing (Великобритания). Характеристики этих ДУС на порядок превосходят характеристики датчиков ADIS16251 при тех же габаритах, массе и энергопотреблении. Испытания датчиков CRG20-01 показали, что их точность сопоставима с точностью оптического канала.

С помощью этих датчиков стало возможным прогнозирование положения звезд в кадре, из-за чего был существенно расширен диапазон рабочих угловых скоростей оптического канала и значительно повышено быстродействие алгоритмического и программного обеспечения датчика. Также существенно возросла точность определения параметров ориентации при засветке поля зрения прибора, а также при превышении максимально допустимой угловой скорости.

Параллельно в ИКИ РАН ведется разработка прибора БФНИ (блок формирования навигационной информации) [15, 16], который способен определять все параметры движения КА. Прибор содержит датчики угловой скорости, приемник спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, солнечный датчик грубой ориентации и магнитометр. Кроме того, прибор способен перехватывать от звездных датчиков информацию об ориентации на шине МКО (мультиплексный канал обмена), по которой строится равноточная по всем осям ориентация и осуществляется калибровка датчиков угловой скорости. В режиме точной ориентации прибор способен с частотой 10 Гц выдавать параметры ориентации с точностью не ниже 10 угл. с, координаты центра масс с точностью не ниже 10 м, текущее время с точностью не хуже 0,2 мкс.

Наземные испытания датчиков угловой скорости CRG20 и SiRRS01 фирмы Silicon Sensing (Великобритания) проводились в ИКИ РАН для оценки возможности и целесообразности их использования в составе интегрированного прибора ориентации БОКЗ-МФ-01 и БФНИ.

Исследования основных характеристик ДУСов показали, что точность определения ориентации по результатам их измерений достаточна для использования этих данных в качестве априорной информации во всех режимах работы звездного датчика, т.е. на фиксированном временном интервале, инерциальный канал, построенный на основе датчиков угловой скорости CRG20 и SiRRS01, может рассматриваться как полнофункциональный канал, эквивалентный оптическому каналу.

Для оценки радиационной стойкости ДУС CRG20 к ионизирующему излучению проводились испытания на источнике излучения Co-60 с последующим их отжигом в активном режиме. В результате получены зависимости параметров датчиков от накопленной дозы, показавшие достаточно высокую радиационную стойкость ДУС CRG20.

Интегрирование приборов определения ориентации ведет к уменьшению числа сборочных единиц на борту КА, сокращению кооперации изготовителей, увеличению помехозащищенности прибора, упрощению процессов сборки и испытаний готового изделия, к уменьшению удельной стоимости составляющих единиц.

Совместное использование информации с оптических звездных датчиков и гироскопов [17] характерно для многих КА, что обусловлено особенностями датчиков обоих типов. В отличие от звездных датчиков, гироскопы функционируют в широком диапазоне угловых скоростей и независимо от внешних оптических условий. Однако при отсутствии коррекции по измерениям от других приборов, точность определения угловой скорости и параметров ориентации со временем снижается.

В настоящее время все шире разрабатываются интегрированные приборы, в состав которых входят достаточно медленные звездные координаторы и значительно более быстродействующие датчики угловой скорости. Математическая обработка информации с обоих типов датчиков позволяет определять параметры ориентации и угловой скорости с высокой точностью и частотой (порядка 10 и выше Гц), которая необходима для работы системы управления движением КА.

Сферы применения миниатюрных ДУС и гироскопов уже сегодня чрезвычайно широки — от космонавтики, авионики и автомобильной электроники до цифровых фотоаппаратов. Гарантия тому — резкое снижение цены таких датчиков. Если традиционные гироскопы — это относительно сложные и дорогие приборы, то подавляющее большинство миниатюрных гироскопов представляют собой МЭМС — системы, которые изготавливают по технологиям, близким к технологиям изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС). Такие устройства производятся массово и стоят столько же, сколько и другие микросхемы, — единицы–десятки долларов.

Мы делаем акцент на серийно производимые устройства и пока оставляем без внимания технологические особенности изготовления МЭМС-гироскопов и многие из их свойств, которые важны для специальных применений. Практически все МЭМС-гироскопы вибрационные. Это означает, что в каждом есть рабочее тело, которое в простейшем случае совершает

возвратно-поступательное движение в плоскости. Если поставить это тело на вращающуюся платформу, плоскость которой совпадает с плоскостью колебаний, то на колеблющуюся массу начнет действовать сила Кориолиса: $F_c = 2m[\Omega \times v]$, где Ω — вектор угловой скорости (перпендикулярен плоскости вращения); v — вектор линейной скорости тела относительно вращающейся платформы; m — масса тела.

Модуль значения силы Кориолиса определяется соотношением $F_c = 2m\Omega v \cdot \sin\varphi$, где φ — угол между векторами линейной и угловой скоростей.

Итак, сила Кориолиса направлена перпендикулярно направлению колебаний и оси вращения. При противоположных направлениях движения сила Кориолиса также действует в противоположных направлениях. На этом эффекте основан принцип действия вибрационного гироскопа.

Определив силу Кориолиса и зная линейную скорость тела, несложно вычислить угловую скорость и ее изменение (угловое ускорение).

Программно-алгоритмическое обеспечение интегрированных приборов должно обеспечивать решение таких задач:

1) совместную фильтрацию измерений звездного координатора и ДУС для формирования своевременной информации об ориентации и угловой скорости;

2) определение ориентации путем интегрирования измерений ДУС с момента получения последних измерений звездного датчика при отсутствии оптических измерений;

3) уточнение параметров ДУС, подверженных случайному дрейфу, по измерениям звездного координатора;

4) уточнение матрицы взаимной ориентации двух звездных датчиков и построение равноточной трехосной ориентации.

Сегодня есть много задач по проведению постоянного мониторинга поверхности земли и околоземного космического пространства. Решение таких задач может осуществляться путем измерений во многих точках и по некоторому числу интересующих параметров. В этом случае на борту КА достаточно располагать небольшим набором измерительных инструментов.

Установка на борт таких КА нескольких комплексированных приборов ориентации иногда нецелесообразна в силу высокой итоговой стоимости каждого космического аппарата. Для решения задач на основе сетевых структур [18] обычно используют большое количество малых КА со стандартным приборным оснащением. В ряде стран проводятся работы по созданию малых и супермалых аппаратов (микро-, нано- и пикоКА). Наиболее перспективными для решения таких задач являются нано- и пикоКА, что определяется их стоимостью. Нано- и пикоКА также необходимо оснащать системой ориентации, что, в свою очередь, требует создания миниатюрных датчиков. Уже существуют датчики ориентации массой в сотни граммов, что приемлемо даже для супермалых КА. Такие датчики должны быть надежными и универсальными, поскольку предназначены для поддержки выполнения нескольких функций системы управления КА. Они должны, например, выполнять функции звездного и солнечного датчиков, что важно для борьбы с засветками чувствительных элементов звездных координаторов и начального позиционирования приборов определения ориентации, датчиков угловых скоростей, что важно при высоких скоростях вращения. Для орбитальных и суборбитальных полетов возможно также использование магнитных датчиков, гиромагнитных бесплатформенных

курсовертикалей, интегрированных с оптическими средствами [19, 20] и т.д. Применение универсального датчика с несколькими каналами, работающими на различных физических принципах, позволяет повысить надежность устройства критического назначения, обеспечивает экономию по массе и стоимости аппарата, что особенно важно для малых КА. Основой для интегрированных датчиков астроориентации может являться одна или несколько миниатюрных камер с пониженной чувствительностью, ДУСы средней точности, а на данный момент уже и соизмеримой точностью.

Разработка интегрированных систем астроориентации, функционирующих на разных физических принципах, основана на комплексной обработке первичной информации из различных источников в целях повышения быстродействия, надежности и точности автономной системы ориентации. Среди схем комплексирования систем ориентации различных типов наибольшее распространение [20] нашли инвариантные схемы, которые оценивают не параметры ориентации, а их погрешности. Неинвариантные алгоритмы требуют дополнительного привлечения информации о динамике объекта и командах управления. В неинвариантных схемах информация с датчиков используется только для формирования вектора измерения и не учитывает то, что данные ДУС позволяют определить изменение именно тех параметров, которые характеризуют отклонение ориентации объекта.

Привлечение информации ДУС для краткосрочного прогноза ориентации позволяет избавиться от необходимости привлечения данных о динамических свойствах объекта и командах управления. Этот подход позволяет строить инвариантные схемы комплексирования датчиков первичной информации различной физической природы в автономный интегрированный датчик ориентации, который сможет использоваться для широкого круга КА. Это особенно важно при массовом использовании автономных систем ориентации в группировках малых КА ввиду высокой стоимости систем ориентации по сравнению со стоимостью малых и супермалых аппаратов.

Последнее поколение ЗД автономной астроориентации на основе ПЗС-матриц входит в большинство современных систем ориентации и навигации космических средств. Дальнейшее развитие ЗД направлено на использование чувствительных сенсоров с активными пикселями, которые позволяют несколько повысить быстродействие ЗД, являются более радиационно-стойкими, энергосберегающими, дешевыми и компактными. Кроме того, значительное внимание уделяется комплексированию функционально близких приборов и интегрированию источников первичной информации (например гироскопа и ЗД, двух или трех ЗД, приборов спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS).

Возможно создание микросистем ориентации на базе инерциальных, оптических и магнитометрических датчиков микросистемного исполнения, которые должны удовлетворять массогабаритным и точностным требованиям, а также обеспечивать выполнение целевых заданий малоразмерных КА. При этом важным, особенно для малых и супермалых космических аппаратов, является использование инвариантных схем комплексирования систем ориентации, которые оценивают не параметры ориентации, а погрешности их траекторного исполнения.

5. Алгоритм определения ориентации для интегрированного инерциально-оптического ЗД повышенной надежности и быстродействия

Блок-схема алгоритма определения ориентации для интегрированного инерциально-оптического ЗД повышенной надежности и быстродействия на тактах работы оптического канала (ОК) представлена на рис. 2. Более быстрый инерциальный канал (ИК) работает с большей частотой, которая должна быть синхронизирована по первичной информации (ПИ) с ОК. Верифицированные и заверенные данные ориентации периодически вводятся в более быстродействующий ИК.

Важное место для решения задач определения ориентации КА оптическими средствами ЗД занимает задача прогнозирования траектории движения датчика, а именно, траектории движения поля зрения чувствительных элементов. Это позволит минимизировать риск ослепления ЗД и попадания в поле зрения объектива крупных космических тел.

Современные средства получения первичных данных для инерционного канала могут использоваться в ЗД для поддержки функционирования оптического канала, а также для поддержки функционирования датчика ориентации в период потери работоспособности оптическим каналом (высокие угловые скорости, засветка чувствительных элементов оптического канала и пр.). Для использования в инерционном канале ЗД могут применяться бесплатформенные схемы получения первичных инерционных данных и алгоритмы вычисления координат вектора ориентации требуемого порядка точности [21].

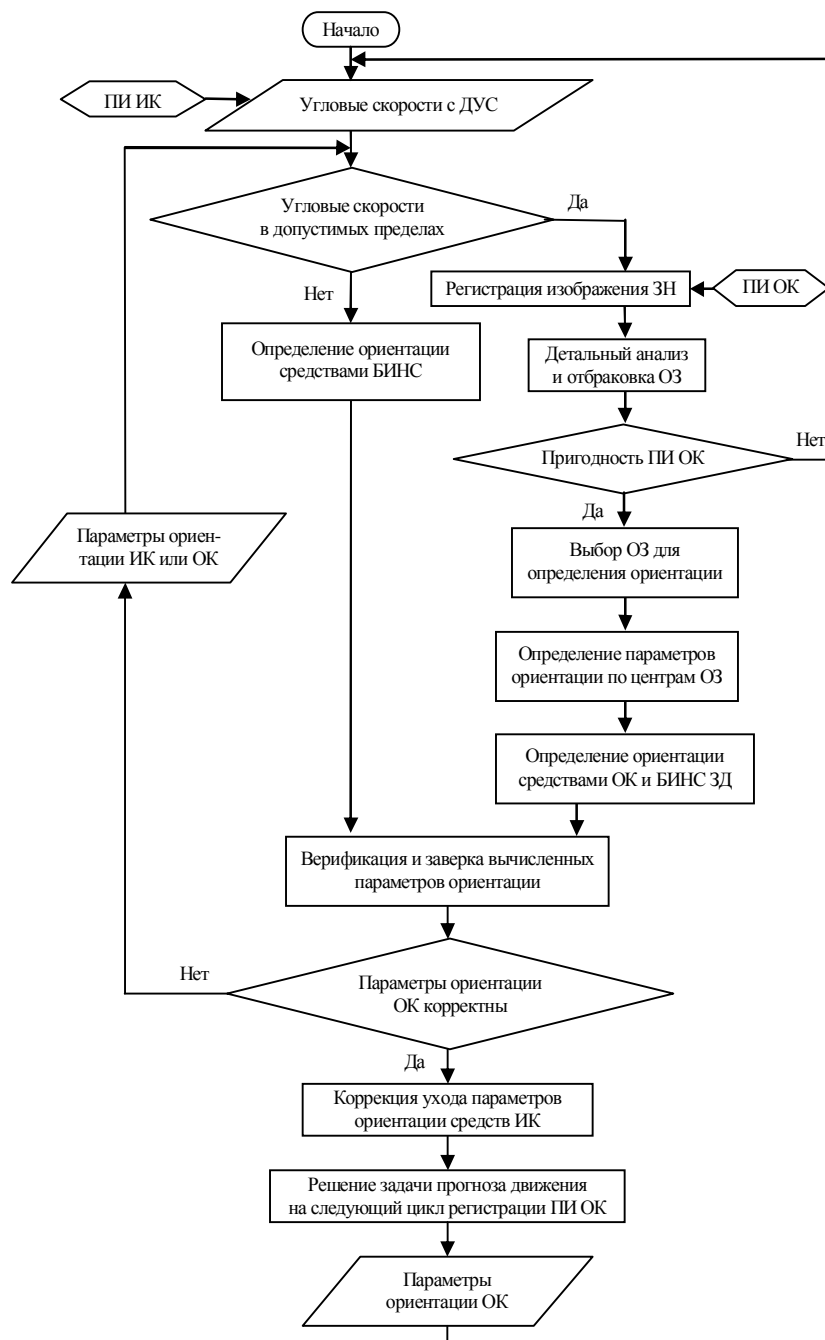


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения ориентации ЗД повышенной надежности: звездное небо (ЗН), первичная информация (ПИ), оптический канал (ОК), окно — звезда (ОЗ), инерциальный канал (ИК); датчик угловых скоростей (ДУС)

Их можно использовать для определения ориентации оптических элементов ЗД на сегмент ЗН. При этом должна учитываться точность алгоритма определения ориентации по данным инерционного канала и быстрдействие оптического канала, в первую очередь — время экспонирования чувствительных элементов оптического канала датчика ориентации.

Заключение

Изучая, с позиции теории катастроф, вопросы повышения надежности звездных датчиков ориентации КА (минимизация риска фатального отказа), следует указать на целесообразность дублирования (резервирования) оптических каналов получения ПИ.

Кроме того, учитывая, что датчики ориентации КА являются приборами критического назначения, которые должны надежно функционировать в условиях с существенно неопределенными факторами, дублирование однотипных каналов имеет некоторые недостатки. Главные из них — зависимость между техническими характеристиками и возможность одновременного отказа всех однотипных каналов.

Поэтому, если это позволяет технология, массогабаритные характеристики и энергетические возможности на борту, следует создавать дополнительные полнофункциональные каналы ориентации, которые работают на разных физических принципах. Это могут быть, например, инерциальный и оптический каналы в ЗД.

Рассматривая возможность повышения надежности датчиков ориентации, следует уделить особое внимание решению таких задач:

- повышение помехозащищенности прибора, т.е. способности датчика нормально функционировать при наличии неблагоприятных инерционных факторов и факторов внешней оптической среды;
- повышение быстродействия и точности определения ориентации;
- обеспечение функционирования прибора в условиях высоких угловых скоростей движения;
- создание равноценных по точности и быстродействию полнофункциональных каналов, способных в штатном режиме автономно определять ориентацию с согласованной точностью и быстродействием, а в штатном режиме работать совместно с лучшими характеристиками.

Последнее время в ИКИ РАН сосредоточено внимание на создании интегрированных приборов определения ориентации на базе датчиков серии БОКЗ. Сначала в аппаратный состав оптического датчика ориентации БОКЗ-МФ были включены низкоточные датчики угловой скорости, выполненные по МЭМС-технологии. Эти датчики, практически не повысив энергетических и массогабаритных характеристик системы ориентации, позволили восстанавливать работоспособность звездного прибора после засветки оптических чувствительных элементов или прохождения со значительной угловой скоростью участка переориентации КА.

В ИКИ РАН ведется разработка нового поколения прибора БОКЗ-М30/500, в котором планируется использовать МЭМС ДУС значительно более высокой точности. Такие датчики позволят прогнозировать положение звезд на следующем кадре и реализовывать оконный режим работы звездного прибора, при котором в обработку берутся только малые «окна» вокруг звезд.

Использование режима малых окон позволяет ускорить распознавание звезд и повысить частоту обновления информации об ориентации, поставляемую звездным прибором. Применение ДУС более высокой точности, соизмеримой с точностью ОК, позволит определять положение малых окон при любом угловом ускорении, повышая тем самым помехоустойчивость определения ориентации, а также повысить быстродействие звездного прибора практи-

чески до быстродействия ИК. Полезными для комплексирования в интегрированном приборе определения ориентации может оказаться солнечный датчик, а для околоземных полетов — системы ГЛОНАСС/GPS-навигации и магнитометры.

Возвращаясь к задаче управления рисками, следует отметить, что целевое интегрированное многоканальное устройство ориентации является более сложным прибором по сравнению даже с многоканальным оптическим звездным датчиком. В этом смысле существенно усложняется программное обеспечение интегрированных устройств критического назначения и их логика работы. Поэтому для адекватного повышения надежности целевого интегрированного многоканального устройства ориентации требуется разработка системы проектирования с поэтапным тестированием компонентов устройства и системы в целом, а также в полном объеме выполнять квалификационные испытания программного обеспечения, созданного с использованием средств проектирования инвариантных систем определения ориентации и управления, что актуально для создания универсальных решений по управлению группировками нано-, микро- и мини-спутников.

1. Квалификационные испытания критического программного обеспечения космических систем: целевая технология независимой верификации и прогнозирования скрытых дефектов / Б.М. Конорев, Ю.Г. Алексеев, С.А. Засуха, Л.П. Семенов, В.С. Харченко, Г.Н. Чертков // *Космическая наука и технология*. — 2008. — 14, № 4. — С. 9–26.
2. Аванесов Г.А., Красиков В.А., Никитин А.В. Оценка точности прибора БОКЗ-М по результатам наземных и летных испытаний. Анализ синхронной работы двух приборов // *Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов*. — Таруса, 2008. — С. 44–45.
3. *Multipurpose star trackers SED16/26*. — http://www.sodern.com/site/FO/scripts/siteFO_contentu.php?mode=&noeu_id=56&lang=E.
4. *HYDRA Star Tracker*. — <http://www.sodern.com>.
5. Набивач В.Е., Опанасенко В.Н., Семенов О.В., Яценко В.А. Алгоритм ориентации космического аппарата с помощью звездного датчика // *Космическая наука и технология*. — 2011. — 17, № 1. — С. 84–89.
6. Арнольд В.И., Варченко А.Н., Гусейн-Заде С.М. Особенности дифференцируемых отображений. — М.: Наука, 1984. — 336 с.
7. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. — М.: Мир, 1980. — 608 с.
8. Томпсон Дж.М.Т. Неустойчивость и катастрофы в науке и технике. — М.: Мир, 1985. — 254 с.
9. Thom R. *Stabilite structurelle et morphogenese*. — N. Y.: W.A. Benjamin, 1972. — 362 p.
10. Том Р. Динамическая теория морфогенеза // *На пути к теоретической биологии*. — М.: Мир, 1970. — С. 145–155.
11. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: В 2-х кн. 1984. — 640 с.
12. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. — М.: Гос. изд-во техн.-теорет. литературы, 1950. — 472 с.
13. Арнольд В.И. Теория катастроф. — М.: Наука, 1990. — 127 с.
14. Дослідження впливу факторів космічної погоди на супутникові прилади та системи / В.О. Яценко, Ю.О. Кліменко, В.С. Набивач, Л.В. Підгородецька, Ю.В. Пруцко, О.В. Семенов, С.О. Черемних // Цільова комплексна програма фундаментальних досліджень «Наукові основи, методичне, технічне та інформаційне забезпечення створення системи моніторингу геосистем на території України (ГЕО-UA)». Зб. наук. звітів. — К.: НАН України, 2010. — С. 136–148.
15. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Дятлов С.А. Интегрированные приборы определения параметров движения космического аппарата // *Современные проблемы ориентации и на-*

- вигации космических аппаратов. — Таруса, 2010. — С. 6, 7.
16. Бессонов Р.В., Дятлов С.А., Куркина А.Н. Результаты наземных испытаний микромеханических датчиков угловой скорости CRG20 и SIRRS01 // Там же, 2010. — С. 43.
 17. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Сазонов В.В. Алгоритмы совместной обработки данных измерений звездных координаторов и датчиков угловой скорости // Там же, 2010. — С. 7, 8.
 18. Многофункциональный звездный датчик для пикокосмических аппаратов / С.А. Антоненко, О.Н. Андреев, Г.В. Захаркин, А.Н. Липатов, А.Н. Ляш, В.С. Макаров, А.П. Экономов // Там же, 2010. — С. 9, 10.
 19. Нестеренко О.И., Сергиенко Н.Ю., Кортуннов В.И., Кравчук А.С. Интегрированная инерциально-оптическая система ориентации // XVIII Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. — СПб: ГНЦРФ ЦНИИ «Электроприбор», 2011. — С. 170–178.
 20. Распопов В.Я., Иванов Ю.В., Алалуев Р.В., Матвеев В.В. и др. Комплексируемые микросистемы ориентации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Там же, 2011. — С. 161–169.
 21. Панов А.П. Математические основы теории инерциальной ориентации. — Киев: Наук. думка, 1995. — 280 с.

Институт космических исследований
НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев

Получено 30.08.2011