Звёздные датчики ориентации в астроинерциальных системах летательных аппаратов

**Р. В. Бессонов, Е. В. Белинская, Н. Н. Брысин,
С. В. Воронков, А. Н. Куркина, А. А. Форш**

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: besson777@gmail.com*

Статья посвящена работам ИКИ РАН по созданию звёздных датчиков ориентации для космической, авиационной и ракетной техники. Представленные результаты отражают достигнутый в последние два десятилетия прогресс, связанный с появлением и внедрением в системы ориентации КА широкопольных звёздных датчиков ориентации. Приборы этого типа позволили изменить подходы к проектированию систем управления угловым движением КА. Появилась возможность выполнять астрокоррекцию практически непрерывно, не останавливая решение целевых задач. Существенно повысилась точность измерения параметров ориентации звёздных приборов. Начали появляться приборы с погрешностью измерения ориентации в доли угловой секунды. В результате в отечественной космической технике приборы звёздной ориентации стали основой для обеспечения точности геопривязки данных ДЗЗ. Также повышалась и помехозащищённость звёздных приборов к таким факторам, как засветка и скорость углового движения носителя. Ещё больший прогресс в помехозащищённости достигается при объединении звёздного прибора с гироскопом. В сочетании с гироскопами широкопольные звёздные датчики оказались пригодны для использования в навигационных системах других типов летательных аппаратов: высотной авиации, ракетах-носителях и блоках выведения.

Ключевые слова: системы ориентации и навигации, астроинерциальные системы, гироскоп, прибор звёздной ориентации, астрокорректор

Одобрена к печати: 22.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-9-20

Введение

Эволюция систем ориентации в космической технике характеризуется определёнными этапами и чертами. Появление в 70–80-х гг. прошлого века матричных фотоприёмников на основе ПЗС привело в космической технике к переходу от узкопольных астрокорректоров, требующих наведения на наиболее яркие звёзды, к широкопольным приборам звёздной ориентации, решающим задачу по изображению произвольного участка небесной сферы (LN-120G Stellar-Inertial-GPS Navigation, www.northropgrumman.com/Capabilities/LN120GStellarInertialNavigationSystem/Documents/ln120g.pdf) (Черенков, Худяков, 2017). С их появлением стало возможным увеличить частоту астрокоррекций гироскопов и выполнять их параллельно с решением целевых задач. Накопление опыта применения и совершенствование звёздных датчиков постепенно привело к непрерывному использованию приборов звёздной ориентации. Стала нормой взаимная поддержка гироскопов и приборов звёздной ориентации. Звёздные приборы обеспечивают непрерывную астрокоррекцию гироскопов, а те, в свою очередь, постоянно формируют для них априорные данные, что в целом позволяет повысить помехозащищённость и надёжность систем управления угловым движением КА. Использование в системе управления нескольких приборов звёздной ориентации с разнесёнными по углу полями зрения позволяет обеспечить непрерывный режим астроизмерений при произвольных манёврах и ориентации изделия. Кроме того, при одновременном использовании пар приборов с близким к ортогональному расположением оптических осей практически на порядок удаётся повысить точность измерения параметров трёхосной ориентации. Точность возрастает за счёт исключения из расчётов параметров ориентации плохо определяемых измерений угла вращения приборов вокруг своей оптической оси.

Для работы с показаниями нескольких приборов звёздной ориентации в системе управления угловым движением КА создаются специальные фильтры, способные обрабатывать данные от датчиков ориентации и высокоточных гироскопов. С появлением КМОП-матриц в наши дни стали разрабатываться приборы звёздной ориентации с уровнем точности и частотой измерений, на порядок превышающими характеристики приборов предыдущих поколений.

При этом для изделий, не требующих высокоточных измерений угловой скорости и критичных к габаритно-массовым характеристикам и надёжности, например для спутников связи, встаёт вопрос о построении безгироскопных систем ориентации. Создаются компактные интегрированные приборы звёздной ориентации с встроенными датчиками угловой скорости (ДУС) низкой и средней точности.

В начале 2000-х гг. начали появляться быстродействующие крупноформатные матричные фотоприёмники, что сделало возможной разработку бесплатформенных астрокорректоров для авиации, выполняющей полёты на больших высотах, начиная с 8 км (Аванесов и др., 2013). Решение задачи наблюдения звёзд на фоне дневной атмосферы в них выполняется благодаря поддержке астрокорректора высокоточным гироскопом и использованию режима цифрового накопления видеоизображений. Астрокорректор позволяет практически полностью исключить накопление угловых ошибок измерения параметров ориентации самолёта при работе в режиме спутниковых навигационных измерений и снизить темп накопления ошибок по координатам и углам при работе в полностью автономном астроинерциальном режиме. Использование нескольких, разнесённых по углу, астроканалов позволяет решить задачу круглосуточного визирования звёзд независимо от углов Солнца к изделию.

На основе звёздных датчиков ориентации и гироскопов удаётся создавать астроинерциальные навигационные системы для широкого круга применений для ракет-носителей и блоков выведения, использующих классические приборы космического назначения, начиная с высот от 80 км.

Построение систем ориентации космических аппаратов ДЗЗ высокого разрешения

Система управления движением большинства современных высокоманёвренных отечественных КА ДЗЗ, таких как «Ресурс-П» и некоторые другие, включает в себя три-четыре прибора звёздной ориентации семейства БОКЗ и группу гироскопов высокого или среднего класса точности, зачастую волоконно-оптических (ВОГ) (рис. 1).

Рис. 1. Система ориентации КА «Ресурс-П», включающая четыре прибора БОКЗ-М60 и ВОГ

Использование нескольких приборов звёздной ориентации стало нормой с учётом того, что разработчикам КА необходимы высокоточные измерения параметров трёхосной ориентации. Требуемый результат достигается путём выполнения синхронных измерений двумя, тремя или четырьмя приборами звёздной ориентации и исключения из их числа грубо измеряемых углов поворота вокруг оптических осей приборов.

На КА ДЗЗ требования по точности угловых измерений определяются исходя из потребностей системы управления, а также с учётом интересов наземных служб обработки данных, выполняющих геопривязку космических снимков. Необходимая для этих целей точность измерений весьма высока: единицы и доли угловой секунды.

Гироскопы на этих КА решают две задачи. В первую очередь от гироскопов требуется низкий уровень шума измерения угловой скорости в целях повышения частоты и точности оценки ориентации КА при совместной фильтрации показаний гироскопа и звёздных приборов. Высокая точность измерений ориентации нужна на коротких интервалах времени (от 10 до 100 с) в процессе съёмки земной поверхности. Зачастую съёмка целевой аппаратурой выполняется при управляемом угловом развороте КА с угловой скоростью до 0,7 град/с, когда точность приборов звёздной ориентации может снижаться.

Вторая задача, которая возлагается на гироскопы, связана с обеспечением гарантированного помехозащищённого управления КА на участках неработоспособности звёздных приборов. Такие ситуации могут возникать на короткое время при угловых манёврах в случаях засветки звёздных приборов Солнцем и Землёй или при превышении допустимой для звёздных приборов угловой скорости.

В отечественной практике вся ответственность за точность выполнения угловых манёвров и точность геопривязки возлагается на звёздные датчики ориентации. На аналогичных КА ДЗЗ серии Geoeye разработки США ответственность за конечный результат в большей степени возлагается на гироскопы. В системах управления таких КА используются твердотельные волновые гироскопы с нестабильностью нуля 0,0005 град/час, т.е. за 1 ч они накапливают ошибку всего 2 угл.с. Шумовые же характеристики находятся на уровне 0,01 угл.с/с и более чем на порядок превышают точность лучших приборов звёздной ориентации. При таком распределении сил основным инструментом, естественно, становится гироскоп, и КА может иметь постоянную высокую точностную готовность, в том числе и на интервалах неработоспособности звёздных приборов. Поэтому звёздных приборов НАСТ на КА Geoeye всего два.

С учётом того, что работоспособность приборов звёздной ориентации БОКЗ определяет точностную готовность отечественных КА, актуальной становится задача максимально быстрого восстановления работоспособности оптических приборов после сбоя, засветки или превышения допустимых угловых скоростей.

Следует отметить, что большинство известных приборов звёздной ориентации работают в двух режимах: начального определения ориентации и слежения за звёздами.

В режиме начальной ориентации прибор анализирует всё своё поле зрения, на что уходит относительно большое время. Решив задачу начальной ориентации, устройство переходит в режим слежения. При этом в обработку берутся незначительные по площади фрагменты кадра — «окна», положение которых прогнозируется на основе предшествующих измерений. За счёт этого достигается максимальная частота обновления информации и высокая помехозащищённость прибора. Поэтому одна из задач, которая решается при поддержке гироскопов, состоит в том, чтобы максимально быстро преодолеть участок начального определения ориентации и вернуться в режим слежения за звёздами. Для этого используется получаемая от гироскопов априорная информация об ориентации, необходимая для прогноза положения «окон» вокруг звёзд на кадре. Так как «окна» могут иметь размер порядка 10×10 угл. мин, то требуемая точность априорной информации от гироскопа лежит в пределах нескольких угловых минут. Такая точность на коротких интервалах времени — несколько минут — может быть обеспечена гироскопами низкой точности.

Существенный скачок в развитии звёздных датчиков ориентации произошёл с появлением радиационно-стойких (при низких температурах), крупноформатных, малошумящих,

высокоскоростных КМОП-матриц. На сегодняшний день в ИКИ РАН создана линейка приборов звёздной ориентации на КМОП-матрицах (рис. 2), на порядок превосходящих по ряду показателей предыдущие поколения приборов. Так, самый высокоточный и тяжёлый из них прибор БОКЗ-ВТ, основанный на 20-мегапиксельной КМОП-матрице, обладает массой 4,5 кг. Он имеет величину случайной составляющей погрешности 0,25 угл. с (СКО) при частоте обновления информации 10–20 Гц и диапазоне угловых скоростей до 8 град/с. Самый миниатюрный прибор МикроБОКЗ с более скромными характеристиками обладает массой всего 600 г, и видны пути дальнейшего её уменьшения (табл. 1).

Таблица 1. Технические характеристики приборов звёздной ориентации БОКЗ

	МикроБОКЗ	БОКЗ-МР	БОКЗ-ВТ
Формат КМОП-матрицы, Мпиксель	4	4	20
Фокусное расстояние объектива, мм	32	60	125
Случайная составляющая погрешности определения направления оси Z в инерциальном пространстве	0,9	0,5	0,25
Диапазон угловых скоростей, град/с	5	4,5	8,2
Частота обновления информации, Гц	4	8	10–20
Информационный интерфейс	RS422	МКО	МКО
Питание, Вт	2,5	8	12
Масса, кг	0,6	2,8	4,5

Важным фактором, влияющим на результирующую точность определения параметров ориентации, является термоупругая деформация конструкции прибора и КА. На рис. 3 (см. с. 13) показаны результаты измерения угла между оптическими осями двух приборов БОКЗ-М60 на КА «Ресурс-П» № 3, снятые с частотой 1 Гц на интервале 10 орбитальных витков (56 000 измерений). На рисунке видны (аппроксимированная линия) витковые термоупругие деформации конструкции, приводящие к изменению угла между оптическими осями двух расположенных рядом приборов на 5 угл. с.

Рис. 2. Приборы МикроБОКЗ, БОКЗ-МР и оптическая головка прибора БОКЗ-ВТ (высокой точности)

Рис. 3. Измерения угла между оптическими осями приборов на интервале 10 орбитальных витков

Показанные на рис. 3 термоупругие деформации могут возникать при недостаточной точности работы системы терморегулирования, обеспечивающей термостабилизацию основания приборов с точностью в несколько градусов. Однако исследование показало, что термоупругие деформации возникают вследствие изменения освещённости бленд звёздных приборов: на одной части орбитального витка бленды освещены солнцем, а на другой находятся в тени.

Для минимизации величины термоупругих деформаций в конструкцию прибора БОКЗ-МР (см. рис. 2) внесены изменения. Бленда теплоизолирована от остальной части прибора. Съём тепла с неё организован по отдельному теплопроводу на элементы конструкции КА. В результате расчётные угловые повороты оптической оси прибора при переходе из освещённого состояния в тень не превышают 0,3 угл. с, при том что случайная составляющая погрешности прибора БОКЗ-МР равна 0,4 угл. с (СКО).

Судя по рис. 4, аналогичным образом установлена бленда на звёздный прибор США HAST (High Accuracy Star Tracker) на КА ДЗЗ Geoeye. Следует отметить, что он является одним из самых высокоточных в мире. Случайная составляющая его погрешности измерения — 0,2 угл. с (СКО). Масса прибора — более 20 кг при весьма внушительных размерах.

Рис. 4. Внешний вид приборов звёздной ориентации HAST на КА ДЗЗ Geoeye

Интегрированный прибор

Существует достаточно много применений звёздных датчиков ориентации, для которых точность измерений в доли и единицы угловых секунд не требуется. Часто не требуется и высокая точность измерения угловой скорости. Например, геостационарные КА связи должны постоянно находиться в орбитальной ориентации, а требуемая точность её поддержания составляет несколько угловых минут.

Кроме того, на этих КА обычно остро стоит вопрос массы, так как их необходимо вывести на геостационарную орбиту, а также вопрос ресурса и надёжности с учётом требуемых сроков их активного существования 15–17 лет. В связи с тем, что без оптических приборов, так или иначе, обойтись не удастся, за рубежом периодически поднимается вопрос о построении безгироскопных систем управления геостационарных КА.

Компромиссным решением для геостационарных КА могли бы стать звёздные датчики ориентации с встроенными в них датчиками угловых скоростей (ДУС) на основе технологии МЭМС.

При введении ДУС в состав прибора звёздной ориентации удастся обеспечить режим его квазинепрерывной астрокоррекции и фактически исключить ошибку, вызванную смещением нуля инерциальных датчиков. При потере оптических измерений ошибки интегрирования только что откалиброванного ДУС на коротких интервалах времени вызваны в основном шумом датчика, что существенно образом меняет отношение к его точностным характеристикам.

В результате работ по данному направлению в ИКИ РАН создано несколько модификаций интегрированных приборов с МЭМС ДУС различной точности, а также стенды для испытания интегрированных приборов. На *рис. 5* представлены образцы интегрированных приборов БОКЗ-МФ.

Показанный на *рис. 5* в сильно увеличенном виде узел трёхосного ДУС на основе МЭМС имеет массу около 30 г. В случае сбоя в работе звёздного датчика он способен сохранить заданную ориентацию КА на протяжении не менее 10 мин, что достаточно для принятия решений по дальнейшей эксплуатации изделия.

В ходе работ созданы методики взаимной калибровки системы координат прибора звёздной ориентации, реализованной фоточувствительной матрицей, объективом и осями чувствительности ДУС. Разработано программно-математическое обеспечение (ПМО), позволяющее проводить квазинепрерывную калибровку ДУС (при наличии оптических измерений) и таким образом скомпенсировать смещение нулей ДУС, погрешности масштабных коэффициентов и направлений осей чувствительности. ПМО обеспечивает фильтрацию показаний угловой скорости ДУС и интегрирование углов при потере работоспособности оптического канала прибора. Использование показаний ДУС позволяет быстро (за 1 с) восстанавливать работоспособность оптического канала при появлении такой необходимости. На *рис. 6* (см. с. 15) показан интегрированный прибор, установленный на трёхосной поворотной платформе, и результаты его работы по реальному звёздному небу.

Рис. 5. Интегрированный прибор БОКЗ-МФ и трёхосный ДУС на основе технологии МЭМС

Рис. 6. Интегрированный прибор БОКЗ-МФ на поворотной платформе и график измерения угла прямого восхождения при работе прибора по реальному небу

Аналогичный прибор ISC был создан несколькими годами ранее в США, в лаборатории Ч. Дрейпера, и выведен в космос на КА ВВС США TacSat-2. По логике построения американский прибор несколько отличался от БОКЗ-МФ, однако в обоих случаях разработчики стремились повысить характеристики помехозащищённости, точности и диапазона угловых скоростей за счёт интеграции астроизмерителя и инерциальных средств.

Следует, однако, отметить, что на текущий момент интегрированные приборы не получили широкого распространения, но это вполне может произойти в будущем, особенно с учётом развития технологии МЭМС и ростом потребностей в спутниках малой размерности.

Астрокорректоры в астроинерциальных системах самолётов

Астрокорректоры на основе широкопольных звёздных датчиков ориентации способны активно поддерживать работу бесплатформенных навигационных систем (БИНС) самолётов на высотах больше 8 км. Фактически это ещё один вариант взаимной поддержки звёздных датчиков ориентации и гироскопов. В отличие от рассмотренного в предыдущем разделе варианта, когда низкоточный ДУС поддерживает работу звёздного датчика, здесь объединяются усилия двух высокоточных приборов.

Наземная выставка авиационных гироскопов позволяет соосному с ним звёздному датчику, выступающему в роли астрокорректора, минуя режим начальной ориентации, сразу сформировать «окна» в зонах ожидаемого появления каталожных звёзд. Работа в «оконном» режиме под управлением гироскопов позволяет многократно уменьшить объём обрабатываемой информации в каждом кадре изображения звёзд небесной сферы. Соответственно, создаются условия для повышения частоты кадров, сокращения времени накопления и цифрового сложения изображений звёзд в «окнах». Последнее позволяет получить значительный выигрыш в отношении сигнал/шум и добиться превышения уровня полезного сигнала над уровнем фона, в том числе в дневное время суток.

Динамика атмосферных летательных аппаратов характеризуется значительными изменениями величины угловой скорости. Информация от БИНС позволяет обеспечить слежение за звёздами в «оконном» режиме и цифровое сложение изображений «окон» с точностью до пикселя на коротких интервалах времени. На основе анализа показаний БИНС удаётся выполнять короткие экспозиции в моменты снижения величины угловой скорости носителя и нахождения её в диапазоне допустимых величин, при которых изображения звёзд не имеют «смазов».

Рис. 7. АИНС, установленная на самолёте Су-27

Эффективность изложенного подхода исследована и подтверждена при разработке ИКИ РАН совместно с австровизирующим устройством (ABU), интегрированным в состав астроинерциальной навигационной системы (АИНС) (рис. 7). ABU прошло полный цикл наземных и лётных испытаний.

На рис. 8 слева показаны угловые скорости Су-27 в полёте, измеренные БИНС, а также моменты съёмки ABU. Несмотря на то что угловые скорости носителя могут иметь значительные величины, существует достаточно много моментов времени, пригодных для съёмки ABU.

Рис. 8. Угловая скорость носителя и моменты съёмки ABU (слева). Изображения «окон» на кадрах ABU: кадр со «смазом» (справа сверху); одиночный кадр звезды величины $5,2^m$ при дневной съёмке (справа посередине); 40 сложенных кадров ABU (справа снизу)

На *рис. 8* справа представлены изображения трёх «окон» вокруг звёзд на кадрах АВУ. Верхний кадр получен при ночной съёмке при угловой скорости, превышающей диапазон рабочих угловых скоростей АВУ. Подобные кадры со «смазом» отбраковываются по показаниям БИНС и не используются для дальнейшей работы. На *рис. 8* справа посередине показано изображение «окна» вокруг звезды величиной $5,2^m$, полученное при дневной съёмке в одиночном кадре. Как видно, на одиночном кадре звезда не различима в фотонном шуме, вызванном рассеянным светом в атмосфере, через который ведётся наблюдение. При выполнении цифрового сложения 40 изображений звезды по показаниям БИНС с точностью до пикселя фотонный шум усредняется, а звезда становится наблюдаемой. Дальнейший алгоритм обработки изображений звёзд принципиально не отличается от работы приборов звёздной ориентации для космических применений.

Как уже было отмечено, благодаря появлению широкоформатных и высокоскоростных КМОП-матриц в последние годы приборы звёздной ориентации для КА получили существенное развитие. Ещё больший эффект может быть достигнут при использовании КМОП-матриц в приборах звёздной ориентации для атмосферных применений. Короткие экспозиции, высокая частота съёмки и скорость получения видеоданных позволяют расширить диапазон угловых скоростей и снизить время, требуемое для накопления кадров в режиме цифрового накопления. Если представленный на *рис. 7* АВУ, собранный на основе ПЗС-матрицы, позволяет получать один кадр с периодом в несколько секунд, то оптические головки, построенные на базе современных КМОП-матриц, способны обеспечить за этот же интервал времени съёмку серии из 50–100 кадров.

Более того, показано, что варьируя такими параметрами, как габариты оптической системы, диапазон угловых скоростей и предельная яркость фона (атмосферы) (*рис. 9, табл. 2*), можно создавать астроприборы для различных применений. Приборы, показанные на *рис. 2*, могут служить прототипами для построения астросистем различных атмосферных ЛА. При построении АВУ на базе оптической головки БОКЗ-ВТ удаётся обеспечить решение задачи астрокоррекции БИНС с высот от 8 км в дневное время в диапазоне угловых скоростей до 2 град/с.

Рис. 9. Спектральная яркость неба при наблюдении в зенит в зависимости от высоты съёмки при зенитном угле Солнца $\theta_s = 40^\circ$ (красные сплошные линии) и при $\theta_s = 87^\circ$ (синяя пунктирная линия)

Использование более компактной версии прибора, по габаритам сравнимой с МикроБОКЗ, позволяет работать на высотах свыше 25 км в диапазоне угловых скоростей до 7 град/с. Оптическая головка БОКЗ-ВТ способна обеспечить на этих высотах (свыше 25 км) наблюдение звёзд без цифрового накопления, что существенно упрощает систему.

Таблица 2. Яркость неба при наблюдении в зенит с различных высот и в различных диапазонах спектра

	Яркость неба, фотон/(м ² с·ср)		
	0,5–1,0 мкм	0,7–1,0 мкм	0,9–1,0 мкм
$H = 0 \text{ км}, \theta_s = 40^\circ$	$8,1 \cdot 10^{19}$	$3,4 \cdot 10^{19}$	$6,3 \cdot 10^{18}$
$H = 0 \text{ км}, \theta_s = 87^\circ$	$5,4 \cdot 10^{18}$	$2,5 \cdot 10^{18}$	$4,0 \cdot 10^{17}$
$H = 10 \text{ км}, \theta_s = 40^\circ$	$5,4 \cdot 10^{18}$	$1,8 \cdot 10^{18}$	$3,8 \cdot 10^{17}$
$H = 20 \text{ км}, \theta_s = 40^\circ$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$1,0 \cdot 10^{17}$
$H = 25 \text{ км}, \theta_s = 40^\circ$	$5,0 \cdot 10^{17}$	$1,6 \cdot 10^{17}$	$3,4 \cdot 10^{16}$
$H = 30 \text{ км}, \theta_s = 40^\circ$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$7,3 \cdot 10^{16}$	$1,6 \cdot 10^{16}$

Следует отметить, что на сегодняшний день приборы БОКЗ-М60 предыдущего поколения, изначально предназначенные для работы на КА, успешно работают на блоке выведения «Волга», где они определяют ориентацию, в том числе на активных участках работы двигательных установок ракеты-носителя и блока выведения, начиная с высот от 80 км.

Как было сказано, в космической технике с целью обеспечения непрерывной астрокоррекции и повышения точности используют несколько приборов звёздной ориентации с разнесёнными полями зрения. На рис. 10 показана АИНС, построенная на паре оптических головок БОКЗ-ВТ, предназначенная для установки на самолёте и способная обеспечить высокоточную круглосуточную астрокоррекцию на высотах более 8 км.

Использование астрокорректора в составе АИНС позволяет решать следующие задачи.

При работе в режиме поддержки спутниковой навигационной аппаратуры точность измерения координат находится на уровне единиц метров. В этом режиме точность измерения углов ориентации определяется астроприбором и составляет единицы угловых секунд.

Рис. 10. Оптическая головка БОКЗ-ВТ и АИНС, основанная на паре оптических головок с разнесёнными полями зрения

При работе в полностью автономном режиме идеология астрокоррекции определяется точностью БИНС и динамикой носителя. При использовании высокоточной БИНС и плавном движении носителя (например, на самолёте) только по показаниям БИНС удаётся построить местную вертикаль, т. е. измерить углы крена и тангажа, с ошибкой на всём протяжении полёта, не превышающей 20–30 угл. с. В этом случае астрокорректор обеспечивает измерения угла азимута (направления на север) и координат места, т. е. углов широты и долготы. Ошибка измерения координат в основном будет определяться ошибкой знания местной вертикали и не должна превышать 1–1,5 км даже при длительных полётах самолётов стратегической авиации.

В случае использования БИНС тактического класса точности и высокой динамики носителя (например, на ракетах) может оказаться невозможным высокоточное построение местной вертикали по измерениям БИНС, и тогда задача разделится на две: определение углов и координат. Точность измерения углов определяется точностью астрокорректора (т. е. единицы угловых секунд), который в том числе снимает ошибки начальной выставки гироскопа, что особенно актуально при использовании на ракетах воздушного базирования с учётом трудностей выставки его в полёте. Точность нахождения координат в этом случае определяется ошибкой интегрирования акселерометров БИНС.

Заключение

Из вышеизложенного следует, что в последние десятилетия оптические приборы астроориентации получили существенное развитие и обеспечили прогресс в системах ориентации и навигации космических аппаратов, авиационной и ракетной технике. Основной прогресс в оптико-электронных приборах вызван развитием элементной базы и программного обеспечения, а также интеграцией оптических приборов с инерциальными и спутниковыми навигационными системами. Видны перспективы дальнейшего развития астроинерциальных систем.

В космической технике перспективы развития связаны с повышением точностных характеристик оптических приборов, расширением их диапазона угловых скоростей, повышением частоты обновления информации вместе со снижением массы, габаритов и энергопотребления. Также целесообразно создание полностью автономных оптических систем навигации и более тесная интеграция прибора звёздной ориентации с инерциальными датчиками.

В авиационной и ракетной технике можно ожидать развития и распространения бесплатформенных астроинерциальных навигационных систем, а также решения оптическими приборами задачи наблюдения спутников и автономного определения не только углов, но и координат при поддержке инерциальными средствами.

Литература

1. Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина А. Н., Людомирский М. Б., Каютин И. С., Ямщиков Н. Е. Автономные бесплатформенные астроинерциальные навигационные системы: принципы построения, режимы работы и опыт эксплуатации // Гироскопия и навигация. 2013. № 3. С. 92–93.
2. Черенков С. А., Худяков А. А. О перспективных астрокорректорах астроинерциальных навигационных систем // Труды Московского института электромеханики и автоматики (МИЭА). 2017. Вып. 18. С. 35–42.

Star trackers in astroinertial systems of flying vehicles

R. V. Bessonov, E. V. Belinskaya, N. N. Brysin,
S. V. Voronkov, A. N. Kurkina, A. A. Forsh

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: besson777@gmail.com

The paper is devoted to the work of IKI on the creation of star trackers for space, aviation and rocket applications. The presented results demonstrate the progress achieved in the last two decades in developing of wide-field star trackers and their introduction into the spacecraft's attitude control systems. Instruments of this type allowed to change the approaches to the design of spacecraft angular motion control systems. It became possible to perform astrocorrection almost continuously, without interrupting the solution of spacecraft target tasks. The accuracy of measuring the orientation parameters of star trackers has significantly improved. The instruments with an orientation measurement accuracy of less than an angular second began to appear. As a result, the star trackers have become the basis for ensuring the accuracy of georeferencing of remote sensing data in Russian space technology. The immunity of star trackers to parasite light and the vehicle angular velocity has been also increased. Even greater progress in immunity is achieved by combining a star tracker with a gyroscope. In combination with gyroscopes, wide-field star trackers turned out to be suitable for use in the navigation systems of other types of vehicles: high-altitude aircraft, launch vehicles and spacecraft upper stages.

Keywords: orientation and navigation systems, astroinertial systems, gyroscope, star tracker, astrocorrector

Accepted: 22.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-9-20

References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Ludomirsky M. B., Cautin I. S. Yamshchikov N. E., Avtonomnye besplatformennye astroinertsialnye navigatsionnye sistemy: printsipy postroeniya, rezhimy raboty i opyt ekspluatatsii (Autonomous strapdown astroinertial navigation systems: principles, operation modes and operating experience), *Giroskopiya i navigatsiya*, 2013, No. 3, pp. 92–93.
2. Cherenkov S. A., Khudyakov A. A., O perspektivnykh astrokorrektorakh astroinertsialnykh navigatsionnykh system (On advanced astrocorrectors of astroinertial navigation systems), *Trudy Moskovskogo instituta elektromekhaniki i avtomatiki*, 2017, Issue 18, pp. 35–42.