

ПОДСИСТЕМА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ С НЕСКОЛЬКИМИ ДАТЧИКАМИ

О.Ю. Стеколыщиков, А.В. Бирюков, А.О. Жуков, А.И. Захаров, М.Е. Прохоров, М.С. Тучин

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (ГАИШ), Москва, Россия

Термоупругие деформации конструкций КА и креплений приводят к отклонению установленных на борту КА оптических датчиков ориентации на несколько угловых секунд, а в некоторых случаях на десятки угловых секунд. При этом серийно выпускаемые датчики звездной ориентации имеют погрешности 1–3 угл. с, а разрабатываемые — десятые доли угловой секунды.

Вместо увеличения прочности креплений предлагается изменять отклонения датчиков от исходных положений с субсекундной точностью и использовать сведения об изменении геометрии системы датчиков при определении ориентации. В ГАИШ МГУ разработан прототип подобной подсистемы геометрического контроля (ПГК).

Ключевые слова: системы ориентации, термоупругие деформации, геометрический контроль.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Большинство современных систем ориентации космических аппаратов (КА) являются комплексными, в их состав входят несколько датчиков различных типов: по несколько гироскопов (одноосных) и датчиков звездной ориентации, по одному или по несколько датчиков направления на Солнце, Землю, датчиков магнитной ориентации, спутникового геопозиционирования и т.д. Перечисленные датчики различаются по своей точности, наиболее точными являются гироскопические и звездные, сегодня они имеют секундные точности и ожидается переход к субсекундным точностям. Точности датчиков других типов ниже, но также достаточно быстро возрастают.

Для обеспечения функционирования комплексной системы ориентации помимо высокой точности каждого из датчиков, входящих в ее состав, необходимо с не меньшей точностью знать взаимную ориентацию датчиков, а также иметь возможность на борту аппарата передавать (переносить) полученную ориентацию на целевую аппаратуру [Прохоров и др., 2016].

В настоящее время взаимное расположение датчиков системы ориентации задается конструктивом КА в целом, а поддерживается за счет механической жесткости. Однако уже при сегодняшних точностях датчиков системы ориентации такой привязки оказывается недостаточно. Так, в работах [Никитин и др., 2011; Карелин и др., 2015] приведены результаты лабораторных и натурных испытаний, которые показывают, что взаимное положение датчиков ориентации изменяется на несколько угловых секунд, а иногда — на 10...20 угл.с под влиянием (по-видимому) тепловых деформаций и механических воздействий. При переходе к субсекундным погрешностям пассивное сохранение взаимной ориентации датчиков станет совершенно невозможным. Это означает, что системы ориентации, содержащие несколько датчиков с собственной погрешностью меньше 3...5 угл.с, выдают неверные показания из-за существенной систематической ошибки. Обзор характеристик звездных датчиков ориентации [Дятлов, Бессонов, 2009] показывает, что указанная проблема стоит перед большинством датчиков, как отечественного, так и зарубежного производства, и практически перед всеми датчиками, разработанными в последнее десятилетие.

Стеколыщиков Олег Юрьевич — старший научный сотрудник, к.т.н., oost@inbox.ru

Бирюков Антон Владимирович — старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., eman@sai.msu.ru

Жуков Александр Олегович — старший научный сотрудник, д.т.н., доцент, aozhukov@mail.ru

Захаров Андрей Игоревич — научный сотрудник, zakh@sai.msu.ru

Прохоров Михаил Евгеньевич — зав. лабораторией, д.ф.-м.н., доцент, mike.prokhorov@gmail.com

Тучин Максим Сергеевич — научный сотрудник, wizard81@mail.ru

При высоких требованиях к точности ориентации нельзя сохранить взаимное расположение датчиков, входящих в систему ориентации, механическим образом. А для одиночного датчика ориентации невозможно с высокой точностью перевести ориентацию датчика в ориентацию целевой аппаратуры КА. При этом тип датчика роли не играет, важна только его точность.

Помимо пассивного поддержания взаимной ориентации датчиков за счет механической жесткости конструкций, которая для секундных угловых точностей недостаточна, существуют еще два возможных способа: активная стабилизация и непрерывный контроль геометрии.

Активная стабилизация подразумевает введение в систему ориентации измерительных и активных элементов. Первые образуют подсистему геометрического контроля (ПГК), которая в реальном времени измеряет взаимное угловое положение датчиков системы ориентации и, при необходимости, другие геометрические параметры. При обнаружении изменений геометрии системы ориентации активные элементы возвращают датчики в исходное (штатное) положение. Достоинством системы с активной стабилизацией является то, что в результате ее функционирования геометрия системы ориентации сохраняется — все изменения компенсируются активными элементами. Поэтому алгоритм обработки данных для активной системы не отличается от алгоритма для используемых сегодня пассивных систем. Отметим, что подсистема геометрического контроля взаимодействует с элементами активной стабилизации и не влияет на обработку данных, получаемых с датчиков. Недостатки по сравнению с пассивно стабилизированной системой ориентации следующие: 1) усложнение системы за счет введения измерительных и активных элементов; 2) конструкция в целом становится подвижной, в ней присутствуют управляемые элементы и электромеханические приводы, что снижает надежность системы.

Система ориентации с непрерывным контролем геометрии включает ПГК, но активные элементы в ней отсутствуют. Сведения о взаимной ориентации датчиков (или об изменении взаимной ориентации) используются при обработке данных с датчиков, результаты измерений обрабатываются для текущей геометрической конфигурации. Конструкция такой системы проще, чем активной, по надежности она не уступает пассивной системе, основанной на жесткости конструкции КА, поскольку также не имеет активных элементов. Алгоритмы обработки данных в системе ориентации с непрерывным контролем геометрии сложнее, чем в двух других типах систем, но современный уровень развития электроники позволяет преодолеть эту проблему.

Последнее направление развития систем ориентации КА кажется авторам статьи наиболее перспективным. Ниже описана предложенная ими конструкция ПГК.

2. КОНСТРУКЦИЯ ПОДСИСТЕМЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Предложенная конструкция ПГК представляет собой трехгранную пирамиду, нижняя грань которой предназначена для крепления системы ориентации к целевой аппаратуре КА, а на боковые грани устанавливаются датчики ориентации, например, три звездных датчика или два звездных и солнечный датчики. Специальное безлюфтовое взаимное крепление граней на шаровые опоры оставляет их «свободными» и допускает их малые взаимные смещения без нарушения плоскостности граней. На ребрах пирамиды устанавливаются высокоточные датчики смещения, которые регистрируют измерения расстояния между выбранными точками соседних граней. На каждом ребре устанавливается от одного до трех датчиков смещения. На рисунках ниже показана конструкция ПГК, в которой установлено по одному датчику на ребре пирамиды.

Внешний вид ПГК показан на рис.1. Основу конструкции ПГК составляют четыре плиты, плоскости которых образуют правильную треугольную пирамиду (тетраэдр).

Плиты имеют разную конструкцию. Плита основания имеет выступающие «лапки» с отверстиями, предназначенные для крепления ПГК к целевой аппара-

туре КА. На боковых плитах с соответствующими крепежными отверстиями устанавливаются два звездных и один солнечный датчик. Механические интерфейсы для крепления звездного и солнечного датчиков показаны на рис.2.



Рис. 1. Внешний вид ПГК

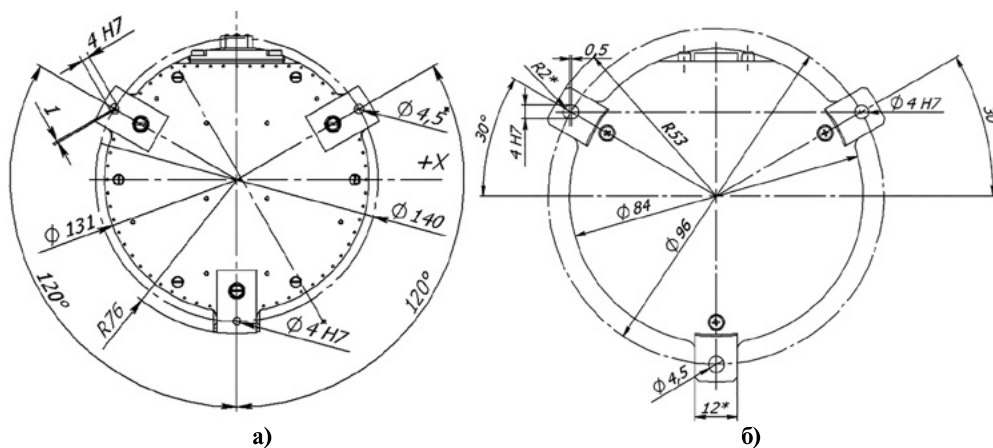


Рис. 2. Механические интерфейсы для крепления датчиков ориентации:
а - звездного; б - солнечного



Рис. 3. Характерный разрез по нижней и верхней сферическим опорам ПГК

Плиты не касаются друг друга непосредственно, а опираются на четыре шаровые опоры, расположенные в вершинах пирамиды. В каждой из четырех вершин пирамиды сходятся три плиты. Каждая шаровая опора жестко крепится к одной из плит, а две другие подвижно опираются на шаровую опору либо конической выборкой в плите, либо через специальные опорные конические шайбы, вложенные в паз и опирающиеся на плоскость плиты (рис.3).

В представленной конструкции мы имеем четыре типа крепления вершин плит на шаровые опоры, а именно:

- жесткую фиксацию;
- фиксацию с возможностью поворота относительно опоры;
- фиксацию с возможностью перемещения вдоль паза по плите и поворота относительно опоры;
- фиксацию с возможностью «свободного» перемещения по плоскости плиты и поворота относительно опоры.

К нижней плите основания все три шаровые опоры крепятся жестко. На каждую шаровую опору через соответствующие опорные шайбы подвижно опираются нижние части боковых плит ПГК. Разрезы, проходящие по этой шаровой опоре для фиксированного, фиксированного с поворотом и фиксированного в пазу с поворотом типа креплений, показаны на рис.4-6.



Рис.4. Разрез нижнего узла крепления по фиксированной на плите шаровой опоре

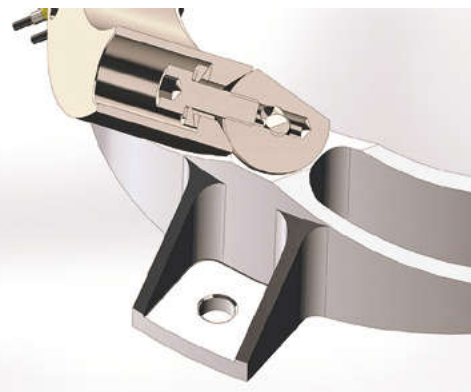


Рис. 5. Разрез нижнего вращающегося узла крепления по шаровой опоре



Рис. 6. Разрез нижнего вращающегося узла крепления с пазом по шаровой опоре



Рис. 7. Разрез верхнего узла крепления по фиксированной на плите шаровой опоре



Рис. 8. Разрез «свободного» верхнего узла крепления по шаровой опоре

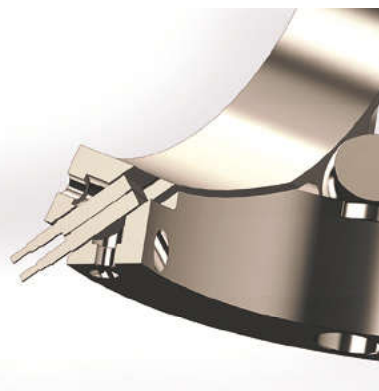


Рис. 9. Один из узлов датчиков смещения макета ПГК

Четвертая шаровая опора крепится с возможностью поворота к верхней части одной из боковых плит. На эту опору через соответствующие опорные шайбы «свободно» с возможностью поворота опираются верхние части двух других боковых плит. Разрезы, проходящие по верхней шаровой опоре с ее фиксацией и при «свободном» верхнем узле крепления даны на рис. 7 и 8, соответственно.

Для боковых плит, каждая из которых опирается на две нижние и одну верхнюю шаровые опоры, реализована система свободного позиционирования классное отверстие — классный паз — свободное отверстие (свободная точка). При такой системе позиционирования однородные тепловые деформации плит (которые могут быть не одинаковыми для разных плит) не приводят к изменению их формы, допуская смещение плиты в направлении «классное отверстие — классный паз». Реализация классных отверстия и паза, а также свободной точки осуществляется с помощью опорных шайб: сферической и двух типов конических шайб. В случае «классного паза» опорная на сферу коническая шайба вложена в паз, а в случае «свободной точки» шайба просто лежит на грани плиты.

Для определения изменений взаимной ориентации датчиков, закрепленных на боковых плитах ПГК, измеряются взаимные смещения середин сторон для каждой пары плит. Для этого на плитах в этих местах устанавливаются дифференциальные датчики смещения (рис.9). В непосредственной близости от них располагаются и точки крепления на плитах двух звездных и одного солнечного датчиков.

В качестве дифференциального датчика смещения предполагается использовать емкостный дифференциальный датчик смещения D-100.00 производства фирмы Physik Instrumente (Германия) [PI, 2015]. Внешний вид семейства этих датчиков представлен на рис.10, чертеж — на рис.11, а основные технические характеристики приведены в таблице.

Технические характеристики датчика D-100.00

Номинальный интервал измерений, мкм	100
Допустимый интервал измерений, мкм	300
Разрешение (в % от ном.интервала измерений)	0,0005
Нелинейность (в %)	0,01
Площадь активной области датчика, мм ²	113,1
Тепловой дрейф, 1/К	5×10^{-5}
Рабочий интервал температур, °C	От –20 до +80
Материал корпуса датчика	алюминий

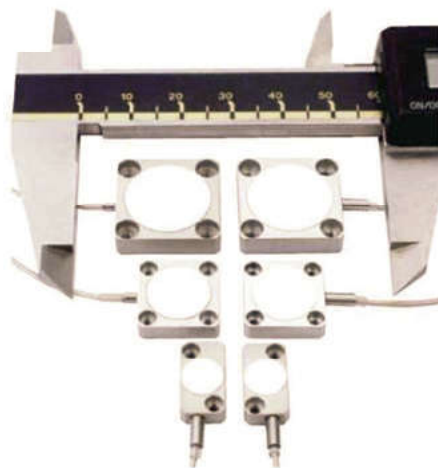


Рис.10. Внешний вид семейства высокоточных дифференциальных емкостных датчиков смещения фирмы Physik Instrumente. Датчики D-100.00 — верхняя пара. Фото взято с сайта <http://www.physikinstrumente.com>

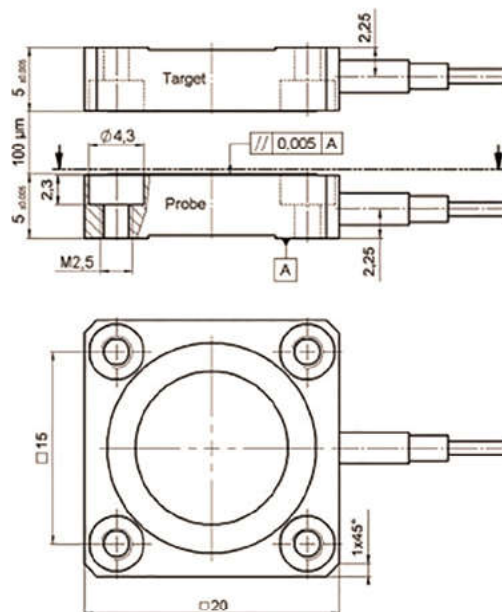


Рис.11. Габаритный чертеж датчика D-100.00. Размеры приведены в миллиметрах

Датчик устанавливается в зазоре между пластинами, поэтому на рис.1 видны только край датчика и кабели от него (в середине ребер пирамиды). На рис. 9 показан разрез ПГК, проходящий через место установки датчика смещения (датчик и его контакты изображены в левой части рисунка).

Разработка описанной конструкции ПГК была выполнена при финансовой поддержке Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках проекта RFMEI60414X0094.

ЛИТЕРАТУРА

- [Дятлов, Бессонов, 2009] Дятлов С.А., Бессонов Р.В. Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов // Всероссийская научно—техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: Сб. тр. 22-25 сент. 2008 г. Россия, Таруса / М.: ИКИ РАН. 2009. С. 11-31.
- [Карелин и др., 2015] Карелин А.Ю., Зыбин Ю.Н., Князев В.О., Поздняков А.А. Многоголовый звёздный датчик 348К. Результаты наземной экспериментальной отработки // 4-я Всероссийская научно—техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов»: Сб. тр. 8-11 сент. 2014 г. Россия, Таруса / Под ред. Г.А.Аванесова. М.: ИКИ РАН. 2015. С. 120-128.
- [Никитин и др., 2011] Никитин А.В., Дунаев Б.С., Красиков В.А. Наземный эксперимент по синхронному определению параметров угловой инерциальной ориентации тремя приборами звездной ориентации БОКЗ-М // 2-я Всероссийская научно—техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов»: Сб. тр. 13-16 сент. 2010 г. Россия, Таруса / Под ред. Г.А.Аванесова. М.: ИКИ РАН. 2011. С. 62-69.
- [Прохоров и др., 2016] Прохоров М.Е., Захаров А.И., Стекольников О.Ю., Тучин М.С., Абу-бекеров М.К., Жуков А.О. Необходимость введения подсистемы геометрического кон-

- троля в комплексные системы ориентации космических и летательных аппаратов при современной точности // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 2. С. 158-160.
- [PI, 2015] PI Datasheet. Capacitive Sensors Sub-nanometer- resolution position sensors D-015, D-050, D-100 [Electronic resource] // Physik Instrumente GmbH [Official website] 2015. URL: <https://www.physikinstrumente.com/en/products/capacitive-and-incremental-sensors/capacitive-sensors/d-015-d-050-d-100-capacitive-sensors-500200/?type=5600&downloadUid=1059&downloadFileUid=937&cHash=6a4ffde47d9de9db4b39a77a69fd1b86> (accessed: 25.08.2016).

GEOMETRIC CONTROL SUBSYSTEM FOR SPACE ORIENTATION SYSTEMS WITH MULTIPLE SENSORS

O.Yu. Stekolshchikov, A.V. Biryukov, A.O. Zhukov, A.I. Zakharov, M.E. Prokhorov, M.S. Tuchin

Sternberg Astronomical Institute of Lomonosov Moscow State University,
(SAI MSU), Moscow, Russia

Best mass produced now attitude star trackers have an accuracy of a few arcseconds, sun sensors — a dozen arcseconds. In the next decade it is expected to increase its accuracy on the order of magnitude.

If the spacecraft has multiple sensors (sensor or with multiple optical systems), it is not possible to ensure the preservation of the sensors relative attitude due to the rigidity of spacecraft constructions at the level of measurement error in modern precision. This fact has been confirmed in a number of laboratory and space experiments. For this reason, there is a significant error in the transfer of the resulting orientation of the target spacecraft equipment.

These deviations leads to misalignment errors of the measured sensor values, which does not allow the orientation of target equipment with the precision that can provide orientation sensors. Because of this, a further increase in the accuracy of the orientation sensor is meaningless without taking special measures to their mutual binding.

Thus, to create the attitude determination system with a arcsecond, and even more sub-arcsecond accuracies comprising several sensors, as well as to transfer such readings to a target system equipment, it is necessary inclusion of these control systems of the geometry. The accuracy of the geometric control subsystem should be of the same order as the accuracy of the sensors.

The paper considers version of the geometric control subsystem design on which two or three high-precision attitude sensor of the different types can be installed.

Keywords: attitude systems, thermo-elastic deformations, geometry control.

Stekolshchikov Oleg Yurievich - senior scientist, PhD, oct@inbox.ru

Biryukov Anton Vladimirovich - senior scientist, PhD, eman@sai.msu.ru

Zhukov Aleksandr Olegovich - senior scientist, doctor, aozhukov@mail.ru

Zakharov Andrey Igorevich - research scientist, zakh@sai.msu.ru

Prokhorov Mikhail Evgenievich - head of laboratory, doctor, mike.prokhorov@gmail.com

Tuchin Maksim Sergeevich - research scientist, wizard81@mail.ru