

Использование системы датчиков гида в задачах наведения и стабилизации телескопа Т-170М проекта «Спектр-УФ»

Г.А. Аванесов, Е.В. Белинская, С.В. Воронков, Н.А. Строилов,
И.Ю. Катасонов, М.И. Куделин, А.В. Никитин

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: servor@nserv.iki.rssi.ru

Описаны принципы совместной работы систем гидирования, наведения и стабилизации космического телескопа Т-170М проекта СПЕКТР-УФ. Цикл наведения телескопа на исследуемый источник условно разделяется на контуры грубого и точного наведения, в которых задействованы система датчиков гида, двигатели-маховики, звездные датчики и датчики угловых скоростей. Совместная работа указанных приборов обеспечивает наведение и удержание объекта в поле зрения научных приборов в течение нескольких часов экспозиции с необходимой точностью.

Ключевые слова: гид, гидирование, наведение, стабилизация, ориентация, космический, телескоп, обсерватория, офсетный, датчик, камера, астроориентация, СПЕКТР-УФ, Т-170М.

Введение

Системы наведения и гидирования являются важными частями любого внеатмосферного телескопа. Они обеспечивают ориентацию космического аппарата, при которой наблюдаемый объект попадает и удерживается в поле зрения научного прибора (спектрографа, камеры, сенсора или др.).

Термин «гидирование» был введен в наземной астрономии в середине XIX в. С появлением астрофотографии выходная апертура телескопа закрывалась фотопластинкой или другим научным прибором, ввиду этого был невозможен визуальный контроль слежения телескопа за наблюдаемым объектом в течение экспонирования. Решением проблемы являлась установка так называемого телескопа-гида – дополнительного телескопа, монтируемого соосно с основным. Гидирующие телескопы продолжают активно использоваться в наземных обсерваториях: высокая точность ведения современных телескопов обеспечивается не только точными двигателями их монтировки, но и наличием обратной связи и учетом управляющих поправок по данным от гида.

Космические обсерватории задают большие требования к точности гидирования, наведения и стабилизации, чем наземные телескопы или другие космические аппараты. Проведенный обзор одиннадцати космических обсерваторий, работающих в разных полосах электромагнитного спектра, показывает эволюцию систем наведения с 1980 г. по настоящее время. Результаты обзора представлены в *табл. 1*. На протяжении всей истории гидирование осуществлялось по звездам и Солнцу в видимом диапазоне. Также выделяются два контура наведения: грубый и точный. В ранних обсерваториях в каждом контуре задействовались разные приборы ориентации и управляющие органы. При своем развитии количество типов используемых приборов уменьшалось, а их точность увеличивалась, что позволяло задействовать одно и то же оборудование как в грубом, так и в точном контурах. Увеличение

точности наведения отражает развитие приемников излучения гидирующих камер, возможностей управляющих органов и разрешающей способности научных приборов.

Таблица 1. Развитие систем гидирования космических обсерваторий

<i>Параметр</i>	<i>1980–1990 гг.</i>	<i>1990–2000 гг.</i>	<i>с 2000 г. по наст. время</i>
Принцип работы	Два контура наведения (грубый и точный)		
Диапазон	Оптический по звездам (+ Солнце)		
Гидирующие объекты	Одиночные звезды	Автоматический выбор одиночных звезд из группы	Группы звезд, автоматическая работа по звездному каталогу
Приемник излучения	ФЭУ*	ФЭУ или ПЗС-матрица	ПЗС-матрица
Точность**, угл. с	Более 0,05	0,05...0,003	Менее 0,003
Органы управления грубого контура	Реактивные двигатели	Двигатели-маховики	Используются двигатели точного контура
Органы управления точного контура	Оптические элементы телескопа или научного прибора		Двигатели-маховики

* ФЭУ – фотоэлектронный умножитель.

** СКО относительной ориентации.

Не существует стандартных решений проблемы наведения космических телескопов. Для каждого проекта задача наведения решается индивидуально, а исходные данные формируются из требований научных приборов, целей миссии, оптических элементов телескопа, диапазона его работы, орбиты космического аппарата и прочих условий.

Задачи систем наведения и гидирования космического телескопа Т-170М проекта СПЕКТР-УФ

Комплекс научных приборов космической обсерватории проекта СПЕКТР-УФ включает:

- блок спектрографов: три УФ-спектрографа с диаметром входных диафрагм 1 угл. с;
- блок камер поля: три канала с полями зрения от 1×1 до 7×7 угл. мин;
- телескоп Т-170М: двухзеркальный телескоп системы Ричи-Кретьен с фокусным расстоянием 17 м, формирующий в фокальной поверхности изображение источников по качеству, близкому к дифракционному;
- служебные и прочие системы, к которым относится система датчиков гида (СДГ).

Аппарат будет работать на геостационарной орбите с периодом 24 ч и временем научных сеансов до 10 ч. Предполагается работа только одного научного прибора за все время выполнения одного научного сеанса.

Имея информацию о научных приборах, можно сформулировать основные задачи систем наведения и гидирования космической обсерватории СПЕКТР-УФ:

- навести аппарат так, чтобы фотоцентр требуемой звезды полушириной менее 0,2 угл. с оказался в щели спектрографа диаметром 1 угл. с с точностью 0,1 угл. с;
- навести центр звездного коронографа камеры поля в требуемую область неба с точностью 0,1 угл. с; для наведения других каналов камеры поля требуется точность абсолютной ориентации 5 угл. с;

- удерживать аппарат до 10 ч в заданном положении с амплитудой колебаний не более 0,03 угл. с.

При необходимости данные с СДГ и гироскопов будут использоваться для восстановления и цифровой коррекции остаточных колебаний космического аппарата при обработке изображений с камер поля, полученных в режиме счета фотонов. При этом важен высокий темп опроса СДГ (1...2 Гц), а точность относительной ориентации должна быть не хуже 0,1 угл. с.

Наведение телескопа Т-170М проекта СПЕКТР-УФ

В разрабатываемом телескопе Т-170М можно выделить два последовательных контура наведения: грубый и точный.

Задача грубого наведения – навести телескоп в область наблюдаемого объекта из произвольной точки и перевести его в квазиустановившийся режим. Грубое наведение выполняется при помощи оборудования базового модуля «Навигатор»: звездных датчиков ориентации, гироскопического измерителя вектора угловой скорости и комплекса управляющих двигателей-маховиков. В процессе работы грубого контура скорость маневрирования снижается, амплитуда колебания аппарата постепенно затухает. По окончании включается система датчиков гида и отрабатывается поправка наведения первым контуром.

Точное наведение и гидирование осуществляется при помощи системы датчиков гида (СДГ). В качестве органов маневрирования и стабилизации используется комплекс управляющих двигателей-маховиков базового модуля «Навигатор». По информации, получаемой с СДГ, бортовой комплекс управления совмещает изображения УФ-источника в фокальной поверхности телескопа с центром входной диафрагмы одного из трех спектрометров либо наводит центр камеры поля на центр заданного участка небесной сферы.

Описание режимов, времён работы, скоростей и точностей наведения приведено в *табл. 2*. Задействованные системы и комплексы в различных режимах наведения представлены в *табл. 3*.

Таблица 2. Цикл наведения

<i>Контур</i>	<i>Режим наведения</i>	<i>Время работы в режиме, с</i>	<i>Угловая скорость маневрирования в режиме, град. с</i>	<i>Точность*, угл. с</i>
Грубый	Переориентация аппарата	< 900	0,2	2500
	Стабилизация	–	$\leq 10^{-4}$	2500
	Включение СДГ	300	$\leq 10^{-4}$	–
Точный	Наведение по данным от СДГ	< 900	$\leq 10^{-4}$	0,01
	Поиск объекта (в случае отсутствия сигнала на научном приборе)	Уточняется	$\leq 10^{-4}$	Уточняется
	Стабилизация	До 10 ч	$\leq 2 \cdot 10^{-5}$	0,01
	Парирование дрейфа телескопа	Уточняется	$\leq 2 \cdot 10^{-5}$	0,01

* СКО наведения оптической оси телескопа в заданную область при работе в режиме и после выхода из него.

Таблица 3. Задействованные системы и комплексы в различных режимах наведения

<i>Контур</i>	<i>Режим наведения</i>	<i>БКУ</i>	<i>КУДМ</i>	<i>ГИВУС</i>	<i>ЗД</i>	<i>СДГ</i>
Грубый	Переориентация аппарата	+	+	+	+	–
	Стабилизация	+	+	+	+	–
	Включение СДГ	+	+	+	+	+
	Отработка поправки по данным от СДГ	+	+	+	+	+
Точный	Отработка поправки по данным от СДГ	+	+	–	–	+
	Режим поиска объекта (в случае отсутствия сигнала на научном приборе)	+	+	–	–	+
	Стабилизация	+	+	–	–	+
	Поправка в случае ухода телескопа	+	+	–	–	+

Примечание. БКУ – бортовой комплекс управления; КУДМ – комплекс управляющих двигателей-маховиков; ГИВУС – гироскопические измерители вектора угловой скорости; ЗД – звездные датчики; СДГ – система датчиков гида; «+» – подсистема задействована; «–» – подсистема не задействована.

Система датчиков гида телескопа Т-170М

Система датчиков гида включает блок обработки данных (БОД) и три датчика гида (ДГ). Датчики монтируются в оптико-механическом отсеке под главным зеркалом телескопа, крепятся на корпусе блока спектрографов вблизи его входных диафрагм. Блок обработки данных устанавливается на приборную панель внешнего расположения и соединяется кабелями с датчиками гида и системами космического аппарата.

Технологический образец СДГ представлен на *рис. 1*. Основные характеристики разрабатываемой СДГ перечислены в *табл. 4*. Расположение датчиков гида относительно входных щелей спектрографов показано на *рис. 2*.

Таблица 4. Основные характеристики разрабатываемой СДГ

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Количество датчиков гида	3
Энергопотребление, Вт: – при одном работающем ДГ – при двух работающих ДГ – при трех работающих ДГ	≤ 20 ≤ 30 ≤ 40
Длина кабелей между БОД и ДГ, м	4
Вероятность безотказной работы	$\geq 0,95$
Срок службы, лет	10
Рабочий диапазон угловых скоростей, град/с	$2 \times 10^{-5} \dots 10^{-4}$
Точность определения углов отклонения: – вокруг оси перпендикулярной линии визирования (σ), угл. с – вокруг линии визирования (σ), угл. с	0,01 15
Единица младшего разряда, угл. с	0,005
Частота обновления информации, Гц	0,5
Поле зрения каждого ДГ, угл. мин	3×3
Предельная регистрируемая звездная величина, m	+17

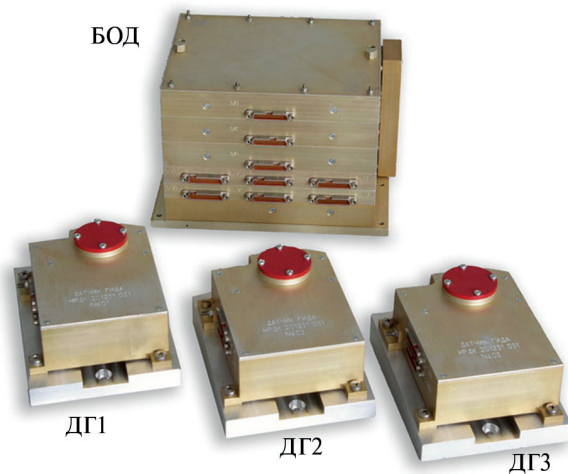


Рис. 1. Технологический образец СДГ: блок обработки данных (БЛОК) и три датчика гида (ДГ1–ДГ3), установленные на технологических плитах

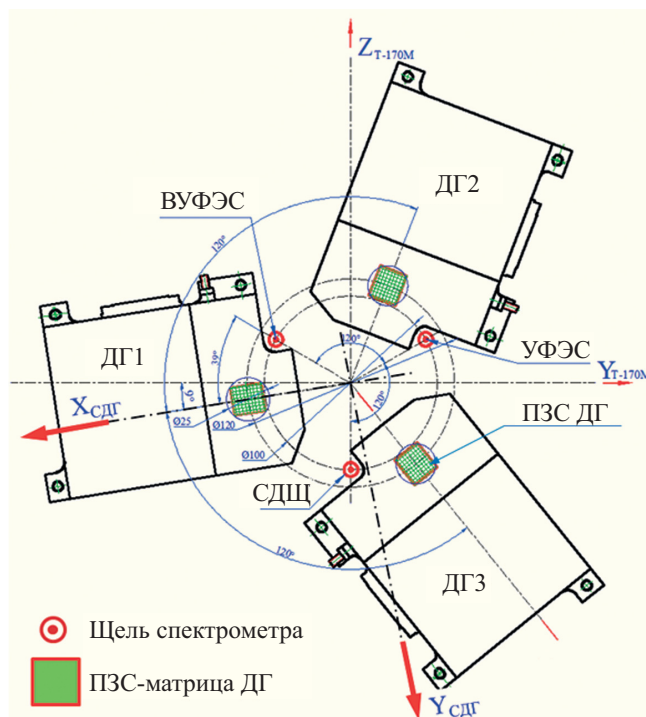


Рис. 2. Расположение датчиков гида относительно входных щелей спектрографов (ВУФЭС – вакуумный УФ-эшелле-спектрограф, УФЭС – УФ-эшелле-спектрограф, СДЩ – спектрограф с длинной щелью), показаны системы координат СДГ и Т-170М

Работа датчиков гида осуществляется по группе звезд в оптическом диапазоне. В качестве приемников излучения СДГ используются ПЗС-матрицы «Сфера-1000». Изображения гидирующих звезд формируются оптикой телескопа без дополнительных оптических элементов. Точность установки датчиков гида гарантирует расположение плоскости ПЗС-матрицы в фокальной поверхности телескопа с ошибкой ± 250 мкм, что обеспечивает приемлемое изображения звезд.

В зависимости от полетного задания, астрообстановки в области научных наблюдений и количества звезд в поле зрения датчиков гида на Земле формируется входная информация для СДГ.

Входная информация для СДГ:

- число задействованных датчиков в сеансе наблюдений (один, два или все три);
- рабочие звездные каталоги для каждого ДГ в выбранной конфигурации;
- точка наведения – требуемая ориентация осей системы координат СДГ во второй экваториальной системе координат, для совмещения наблюдаемого объекта с входной щелью спектрографа или наведения камеры поля;
- дополнительные настройки алгоритмов работы СДГ, такие как время экспонирования, допуск на распознавание, параметры выбора объектов.

Выходная информация с СДГ в бортовой комплекс управления:

- три угла отклонения системы координат СДГ от требуемой ориентации во второй экваториальной системе координат (при работе в режиме «Наведение»);
- три угла отклонения системы координат СДГ от начального момента (при работе в режиме «Наведение» в случае невозможности определения абсолютной ориентации по каким-либо причинам);
- координаты объектов на ПЗС-матрицах датчиков гида (при работе в режиме «Локализация»);
- изображение с ПЗС-матриц датчиков гида (при работе в режиме «Передача изображения»);
- дополнительная информация для контроля работы СДГ;
- телеметрия.

Обмен информацией с системами управления космическим аппаратом осуществляется по магистральному последовательному интерфейсу.

В качестве гидирующих объектов со всех задействованных датчиков гида может быть использовано от 3 до 12 звезд с 5-й по 17-ю звездную величину в полосе R_u (длина волны от 550 до 850 нм). При этом СДГ обеспечивает минимальную погрешность измерений при работе по гидируемым звездам с уровнем блеска от +10 до +16. Выбор оптимальных звезд обеспечивается алгоритмами работы, настройками и входными звездными каталогами.

Система датчиков гида используется для офсетного гидирования, т.е. наблюдаемая звезда научного прибора не наблюдается датчиками гида. Поправочные матрицы для совмещения требуемого объекта со щелью спектрографа или центром камеры поля определяются на этапе калибровки СДГ и учитываются при расчёте точки наведения.

Режимы работы системы датчиков гида

В штатном режиме СДГ работает в одном из трех режимов: «Наведение», «Локализация» и «Передача изображения». Предусмотрена процедура калибровки СДГ.

Режим «Наведение» обеспечивает распознавание зарегистрированных изображений звезд, выдачу целеуказаний для совмещения направления на расчётную точку наблюдения с направлением на щель спектрографа или центр камер поля, слежение за перемещением гидируемых звезд в полях зрения ДГ и расчет углов отклонения системы координат СДГ от требуемого положения.

Режим «Локализация» обеспечивает передачу в бортовой комплекс управления массива координат фотоцентров объектов на ПЗС-матрицах датчиков гида.

Режим «Передача изображения» осуществляет пересылку полученных с датчиков гида кадров с целью дальнейшей их трансляции на Землю через бортовой радиокomплекс.

В ходе летных испытаний и периодически при штатной работе телескопа проводится калибровка СДГ, которая заключается в получении изображений звездного неба тремя датчиками гида, передаче изображений на Землю с целью их дальнейшей обработки. Геометрическая привязка системы координат СДГ к входным диафрагмам спектрометров и центру камеры поля осуществляется путем обработки кадров, полученных одновременно датчиками гида и научными приборами. В результате калибровки определяются: 1) система координат СДГ и 2) матрицы перехода между системами координат трех датчиков гида и системами координат научных приборов.

Работа системы датчиков гида при наведении

В процессе обработки поступивших заявок наблюдений и составлений полетного задания на Земле формируется входная информация СДГ. В зависимости от числа звезд, их расположения и яркости определяется наиболее удачная конфигурация датчиков гида, выбираются рабочие области из мастер-каталога, осуществляется его прореживание, подбираются дополнительные настроечные параметры. Перечисленные процедуры проводятся с использованием специального программного обеспечения.

Требуемая ориентация системы координат СДГ рассчитывается с учетом полученных на этапе калибровки поправок таким образом, чтобы при нулевых отклонениях наблюдаемый источник (или область неба) попадал в щель используемого спектрографа или оказывался в центре камеры поля.

Полученная информация загружается в бортовой комплекс управления для дальнейшего автоматического исполнения в циклограммах наведения.

При работе телескопа СДГ используется в грубом и точном контурах наведения телескопа. Система датчиков гида взаимодействует с бортовым комплексом управления в следующей последовательности (конкретные значения времен работы в режимах наведения, скоростей и точностей наведения приведены в *табл. 2*).

1. Включение СДГ: подача питания на блок обработки данных, самотестирование СДГ, получение информации о готовности к работе.
2. Загрузка в блок обработки данных входной информации.
3. Включение и подготовка к работе выбранных датчиков гида. Получение информации о готовности датчиков к работе.
4. Перевод СДГ в режим «Наведение».
5. Бортовой комплекс управления начинает циклический опрос СДГ. Система датчиков гида определяет ориентацию:
 - при успешном определении ориентации СДГ выдает три угла отклонения от требуемой ориентации; бортовой комплекс управления с использованием двигателей-маховиков осуществляет наведение аппарата в требуемую область;

- при невозможности определения ориентации СДГ выдает три относительных угла отклонения от начала опроса, что позволяет стабилизировать аппарат, получить от СДГ дополнительную информацию для выяснения причины неопределения ориентации, чтобы предпринять дальнейшие действия в циклограмме наведения.
6. В процессе наведения аппарата в требуемую область скорость маневрирования постепенно снижается. При углах отклонения, близких к нулю, аппарат стабилизируется, включается научное оборудование, подтверждается наличие сигнала на щели спектрографа, начинается выполнение научной программы. В случае отсутствия полезного сигнала на щели спектрографа выполняется процедура поиска объекта, которая представляет собой спиралевидное движение аппарата вокруг начальной области.
7. В процессе работы научных приборов бортовой комплекс управления продолжает циклический опрос ориентации от СДГ с целью контроля и парирования дрейфа телескопа.
8. По окончании научного наблюдения СДГ выключается: в блок обработки данных подаётся команда на отключение датчиков, принимается отчет о ходе работы СДГ в течение текущего сеанса, затем снимается питание с блока обработки данных.

Заключение

Наземная отработка технологического образца показывает низкий шум прибора и возможность работы по звездам вплоть до 17^m , при отношении сигнал / шум не меньше 35. При таких характеристиках, а также в случае качественного изготовления зеркал телескопа точность определения ориентации СДГ может быть доведена до 0,001 угл. с.

В настоящее время разработка СДГ находится на стадии изготовления конструкторско-доводочного образца.

Fine guiding system in the World Space Observatory-Ultraviolet mission Space Telescope pointing cycle

**G.A. Avanesov, E.V. Belinskaya, S.V. Voronkov, N.A. Stroilov, I.Y. Katasonov,
M.I. Kudelin, A.V. Nikitin**

*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: servor@nserv.iki.rssi.ru*

The paper describes the principles of the World Space Observatory-Ultraviolet (WSO-UV) mission Space Telescope pointing. Guidance cycle includes rough and fine serial loops, which use Fine Guide Sensors (FGS), Momentum Wheels, Star Sensors and Gyroscopic Meters of the Angular Rate Vector. Collaboration work of these systems provides superposition of the UV-source image on a telescope focal surface with the centre of the entrance diaphragm of a spectrometer or pointing the centre of the given celestial sphere part to the centre of the Field Camera.

Keywords: guide, guiding, pointing, stabilization, orientation, space, telescope, observatory, offset, sensor, WSO-UV, FGS, T-170M.