

ОПТИЧЕСКИЙ СОЛНЕЧНЫЙ ДАТЧИК. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Г.А. Аванесов, Я.Л. Зиман, Е.В. Зарецкая,
М.И. Куделин, А.В. Никитин, А.А. Фори*

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Рассматривается конструкция оптического солнечного датчика, отличительной особенностью которого является наличие кодирующей маски, обеспечивающей определение направления на Солнце с заданной точностью в заданном поле зрения.

Кроме базового варианта солнечного датчика, рассматриваются его модификации с двумя и более оптическими головками, позволяющими расширить поле зрения при сохранении высокой точности определения направления на Солнце.

Приведена схема стенда для наземных испытаний прибора. Рассматривается перспектива дальнейшей модернизации наземного оборудования с целью создания универсального стенда, объединяющего возможности проведения геометрической калибровки прибора, динамических испытаний и привязки внутренней системы координат прибора к его посадочной плоскости.

Design of the Optical Solar Sensor is considered. The distinctive feature of this sensor is the coding mask providing determination of the towards the Sun direction with the given accuracy within the given field of view.

In addition to the basic solar sensor design another two modifications with two or more optical heads making it possible to widen the field of view while preserving high accuracy of determining direction towards the Sun are considered.

Structure of a bench for the instrument ground testing is given. The future ground facilities modernization is considered in order to create a universal bench combining possibilities for the instrument geometrical calibration, dynamic tests and referencing the instrument's internal coordinate system to its adapter.

В ИКИ РАН разработан и изготовлен прибор ОСД (оптический солнечный датчик). Прибор с положительными результатами прошел наземную отработку, и в настоящее время четыре летных образца ОСД проходят испытания на борту космического аппарата.

Необходимость разработки нового прибора была обусловлена возникновением потребности в навигационном устройстве, которое оптимально сочетало бы в себе такие качества как широкое поле зрения, высокую точность, быстродействие, надежность и при этом обладало бы радиационной стойкостью при сравнительно небольших габаритах.

Назначение прибора ОСД — определять направление на центр видимого диска Солнца с последующим представлением выходной информации в виде направляющих косинусов в системе координат прибора. Система координат прибора реализуется его посадочным местом.

Внешний вид прибора в приборной системе координат представлен на рис. 1.

Конструктивно ОСД представляет собой моноблок, в котором на общем основании расположены электронные модули и оптическая головка.

Оптической головкой мы называем часть фотоприемного устройства, состоящую из ПЗС-линейки и кодирующей маски, объединенных в общем корпусе.

Поскольку кодирующая маска является тем элементом, который обеспечивает поле зрения прибора и существенным образом влияет на его точность, особое внимание при конструировании прибора было уделено геометрическому расчету кодирующей маски и оптической головки в целом.

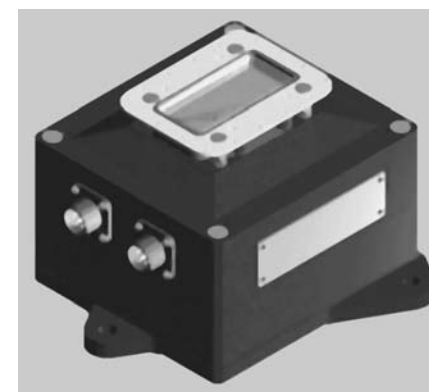


Рис. 1. ОСД. Внешний вид прибора

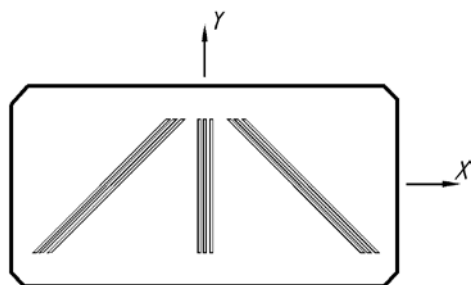


Рис. 2. Схема кодирующей маски

Схема кодирующей маски показана на рис. 2.

Кодирующая маска представляет собой прямоугольную призму, выполненную из радиационно стойкого оптического стекла с нанесённым на него светонепроницаемым покрытием. Покрытие имеет девять прозрачных щелей, объединенных в три группы и расположенных веерообразно. Крайние группы щелей образуют с центральной группой угол 45° . Тройирование щелей обеспечивает надежность работы прибора.

Ширина щелей была подобрана таким образом, чтобы обеспечить колоколообразную форму сигнала на приемнике.

При значениях этого параметра больше оптимального у сигнала от щели наблюдается плоская вершина, которая приводит к потере точности при определении координаты энергетического центра изображения щели.

При выборе ширины щели меньше оптимальной на вершине сигнала наблюдаются дифракционные максимумы, что также приводит к потере точности.

Ширина всех девяти щелей выбрана одинаковой. При этом полученная ширина изображений от щелей крайних групп $d_{кр}$ отличается от ширины изображения щелей центральной группы $d_{ц}$:

$$\frac{d_{кр}}{d_{ц}} = \frac{1}{\cos 45^\circ} = \sqrt{2}. \quad (1)$$

Данное свойство используется математическим обеспечением ОСД при идентификации центральной группы

щелей. Для идентификации крайних групп щелей расстояния от левой и правой группы до центральной различаются между собой.

Для идентификации щелей внутри групп расстояния от левой и правой щелей до центральной отличаются друг от друга.

Расстояние между щелями в группе выбрано так, чтобы сигналы от соседних щелей не перекрывались.

Определенные таким образом параметры щелей являются исходными данными для расчета фокусного расстояния прибора, т. е. расстояния от чувствительной поверхности ПЗС-линейки до поверхности кодирующей маски, на которую нанесено покрытие со щелями.

Фокусное расстояние рассчитано таким образом, чтобы при работе на краю поля зрения на ПЗС-линейку попадали бы световые штрихи от щелей центральной группы, как это видно из оптической схемы прибора (рис. 3).

Из указанного условия следует неравенство:

$$f \leq \frac{L - \delta_c - d_1 - d_2 - \Delta_x}{2 \operatorname{tg} \xi_{x\max}} - \frac{\Delta_f}{2}, \quad (2)$$

где L — длина ПЗС-линейки; δ_c — ширина сигнала; Δ_x — максимально допустимое смещение проекции центральной щели относительно середины ПЗС-линейки; d_1, d_2 — расстояние между щелями в группе; Δ_f — допуск на фокусное расстояние; $\xi_{x\max}$ — проекция угла поля зрения на плоскость ZOX .

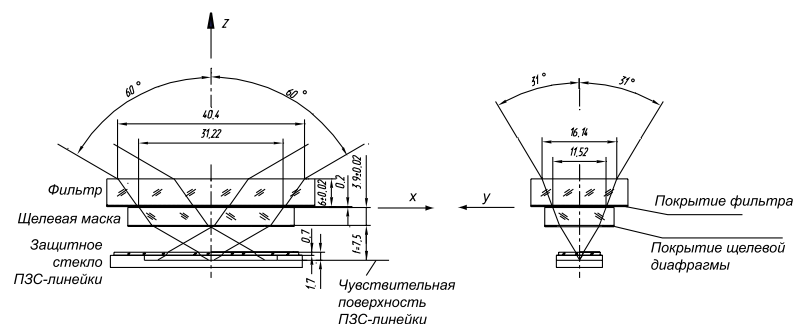


Рис. 3. Оптическая схема прибора

Расчет производился для конкретного типа примененной в приборе ПЗС-линейки.

Учитывая то, что при уменьшении фокусного расстояния прямо пропорционально этой величине понижается точность определения направления на Солнце, из неравенства (2) выбирается максимальное значение f .

Исходя из расчетного значения фокусного расстояния и заданного угла поля зрения, в соответствии с оптической схемой прибора (см. рис. 3) определяется длина щелей l по следующей формуле:

$$l \geq 2f \operatorname{tg} \zeta_{y \max} + \delta_c + \Delta_y, \quad (3)$$

где Δ_y — точность установки кодирующей маски относительно ПЗС-линейки вдоль оси OY ; $\zeta_{y \max}$ — проекция угла поля зрения на плоскость YOZ .

При длине щели оптического элемента больше минимальной L_{\min} размеры оптического элемента возрастают.

Для обеспечения заданного угла поля зрения и минимизации габаритов оптического элемента оптимальная длина щели считается минимальной L_{\min} .

Корпус, в котором размещены кодирующая маска и ПЗС-линейка, выполнен из материала с низким коэффициентом линейного расширения для обеспечения стабильности фокусного расстояния при изменениях температурного режима.

Разработанный и изготовленный прибор соответствует требованиям технического задания и имеет следующие технические характеристики.

Поле зрения	62×120°
Предельная суммарная погрешность наведения на Солнце (3σ)	3 угл. мин.
Угловая скорость КА	5 град/с
Масса	650 г
Энергопотребление	4 Вт
Габаритные размеры	120×112×72,5 мм

Радиационная стойкость прибора позволяет нормально функционировать в течение семи лет на низких, высокоэллиптических и геостационарных орбитах.



Рис. 4. Лабораторный испытательный комплекс

В процессе отработки прибора проводились как натурные, так и лабораторные испытания. Для наземной отработки был создан лабораторный испытательный комплекс, внешний вид которого представлен на рис. 4.

В состав комплекса входят имитатор Солнца, коллиматор и три сменных устройства: стенд СГКИ (стенд геометрической калибровки и испытаний), имитатор посадочного места и поворотное приспособление для проведения динамических испытаний.

В качестве имитатора Солнца выбран источник света ИС-1000, генерирующий лучистый поток с заданными параметрами.

Источник света создан на базе ксеноновой лампы сверхвысокого давления с температурой дуги 6000 К. Эта температура близка к температуре излучающей поверхности Солнца.

Выходящее излучение выравнивается с помощью канального кварцевого интегратора.

Имитатор Солнца размещен на опорно-юстировочном устройстве, предназначенном для совмещения оси светового потока, излучаемого осветителем, с осью коллиматора.

На выходе из коллиматора формируется излучение с параметрами, близкими к параметрам внеатмосферного солнечного излучения около Земли.

Световой поток диаметром 50 мм попадает в фотоприемник прибора ОСД. Прибор устанавливается на одном из сменных устройств лабораторного испытательного комплекса.

Для проведения геометрической калибровки ОСД используется стенд СГКИ.

Стенд предназначен для установки прибора относительно лучистого потока под разными углами в горизонтальной и вертикальной плоскостях и фиксации его в заданном положении для снятия показаний с прибора. Основными элементами стенда являются теодолит и квадрант. Для снятия нагрузки осей стенда предусмотрена система обезвешивания.

Для динамических испытаний предусмотрено поворотное устройство, обеспечивающее разворот прибора относительно светового потока с различными скоростями.

Третье сменное приспособление — это имитатор посадочного места прибора. Имитатор служит для перевода внутренней системы координат, связанной с кодирующей маской, в приборную систему координат, связанную с посадочной плоскостью прибора.

В настоящее время рассматривается возможность использовать прибор ОСД на объектах с ресурсом до 12 лет и с повышенными требованиями по механическим воздействиям и радиационной стойкости.

В связи с этим проводится доработка прибора под новые требования. В частности, в последующих образцах ОСД предполагается замена ПЗС-линейки на ее аналог, обладающий более высокой радиационной стойкостью, что подтверждено испытаниями, проведенными специалистами ИКИ РАН.

Кроме того, для расширения сферы применения прибора ОСД на различных типах космических аппаратов ведется работа по снижению массы прибора и увеличению поля зрения.

Уменьшение массы прибора достигается применением более легких магниевых сплавов взамен алюминиевых для изготовления корпусных деталей блоков электроники. В настоящее время уже изготовлен облегченный вариант технологического образца. Масса его не превышает 500 г.

Разработана и находится на стадии изготовления новая модификация кодирующей маски, которая позволит несколько расширить поле зрения прибора.

Однако существенное увеличение поля зрения прибора в рамках существующей конструкции не представляется

возможным без потери точности, так как эти две характеристики прибора находятся в обратно пропорциональной зависимости.

В связи с этим возникла идея создать на основе базового варианта ОСД его модификации с двумя и более оптическими головками, размещёнными в едином корпусе.

Примеры модифицированных приборов показаны на рис. 5–9. Это солнечные датчики с двумя, тремя и четырьмя оптическими головками.

Различные варианты размещения оптических головок на приборе дают возможность выбирать ту сферу обзора, которая будет необходима в каждом конкретном случае.

При размещении двух оптических головок под углом 120° прибор имеет квадратное поле зрения $120 \times 120^\circ$ (рис. 5).

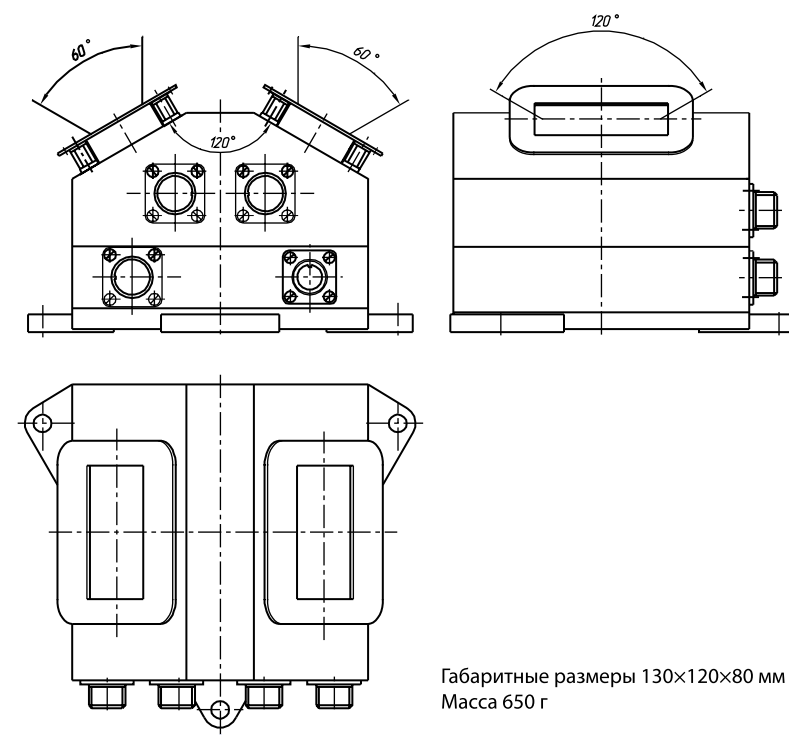


Рис. 5. Две оптические головки. Поле зрения $120 \times 120^\circ$

При угле между головками 90° поле зрения прибора составляет $60 \times 210^\circ$ (рис. 6).

Три головки, размещенные под углом 60° друг к другу, обеспечивают поле зрения $120 \times 180^\circ$ (рис. 7).

Наконец, при использовании четырех оптических головок поле зрения можно довести до полусферы (рис. 8, 9).

Параллельно с усовершенствованием прибора модернизируется и испытательное оборудование.

Лабораторный испытательный комплекс, вместо сменных приспособлений, оснащается двухступенной поворотной платформой, позволяющей выполнять все три задачи: геометрическую калибровку, привязку внутренней системы координат прибора к посадочному месту и проведение динамических испытаний.

Конструкция платформы приведена на рис. 10. Прибор устанавливается на плиту, имитирующую посадочное место ОСД на КА.

Вращение прибора в двух плоскостях обеспечивается шаговыми двигателями.

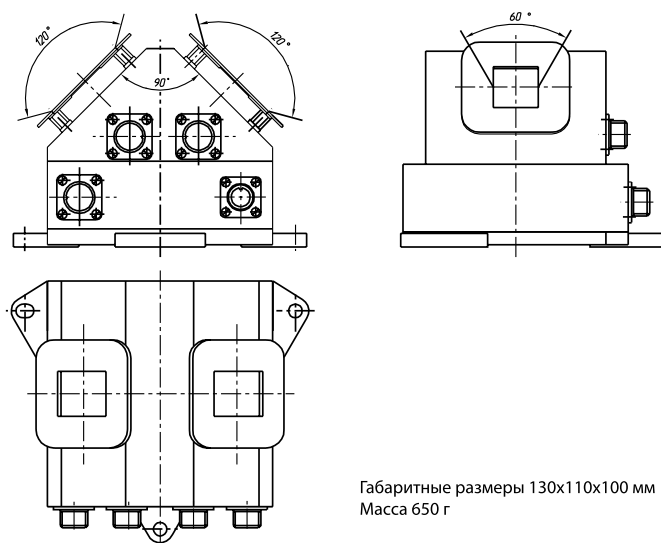


Рис. 6. Две оптические головки. Поле зрения $60 \times 210^\circ$

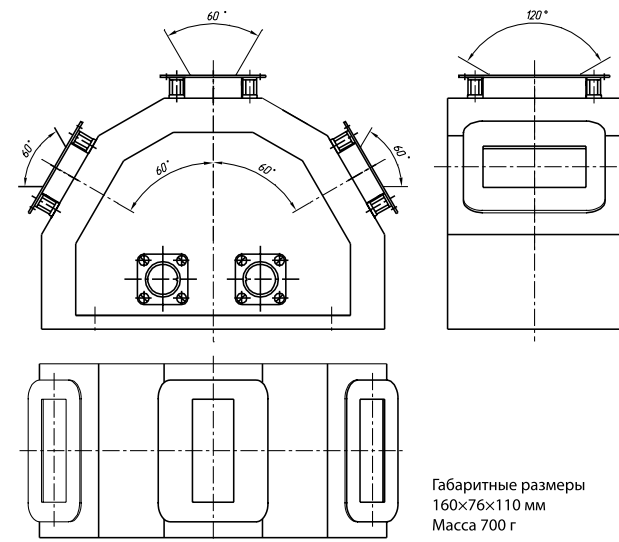


Рис. 7. Три оптические головки. Поле зрения $120 \times 180^\circ$

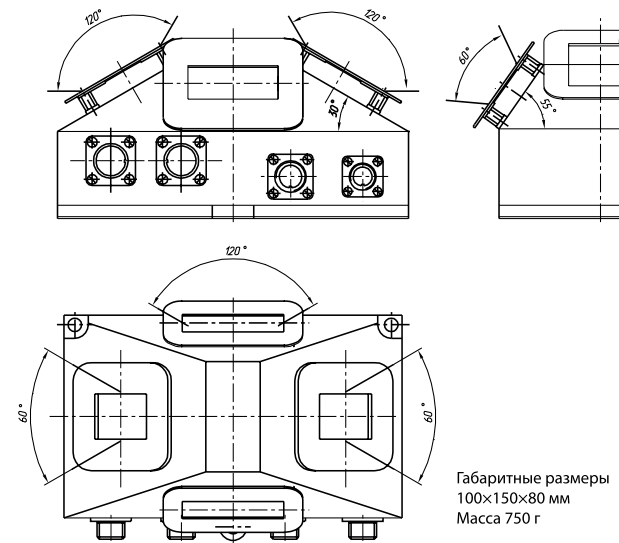


Рис. 8. Четыре оптические головки. Поле зрения $170 \times 180^\circ$

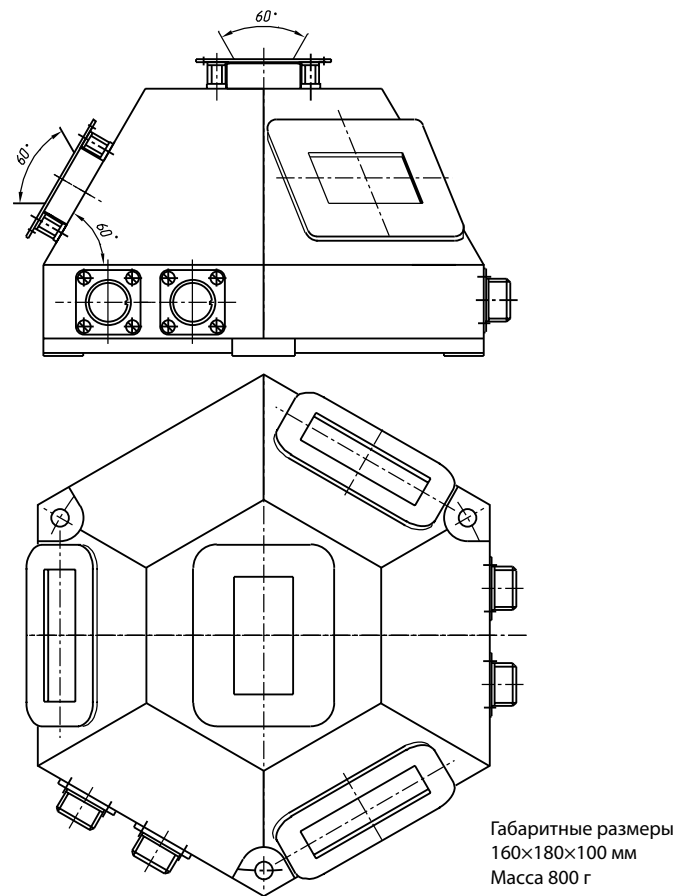


Рис. 9. Четыре оптические головки. Поле зрения $180 \times 180^\circ$

Юстировочными устройствами линейного и углового перемещения приводятся в общую плоскость оси вращения стенда и обеспечивается их взаимная перпендикулярность, а также параллельность осей прибора осям стенда.

Поворотная платформа закрывается специальным кожухом, внутри которого будет поддерживаться заданный диапазон температур от -15 до $+45$ °С для проведения испытаний в условиях, приближённых к реальным.



Рис. 10. Поворотная платформа

В настоящее время поворотная платформа находится на стадии изготовления.

В качестве имитатора Солнца предполагается использовать тот же осветитель ИС-1000, с возможной заменой ксеноновой лампы на лампу большей мощности для получения более стабильных параметров излучения.

Таким образом, лабораторный испытательный комплекс становится более универсальным, пригодным для проведения большего объема испытаний и рассчитанным на работу не только с базовым вариантом прибора, но и с его возможными модификациями.

Все вышеизложенное дает уверенность, что прибор ОСД по праву займет достойное место в многочисленном семействе солнечных датчиков.