

4. Так как точность определения ориентации существенно зависит от угла наклона оси  $Z$  к осям аппарата, для исключения влияния ошибки определения угла поворота вокруг оси  $Z$  на точность определения инерциальной ориентации КА целесообразно использовать информацию с двух синхронно работающих приборов. В результате определения инерциальной ориентации базовой системы координат для двух приборов за 5 мин и аппроксимации данных измерений было установлено, что точность определения ориентации базовой системы координат не превышает 1,5 угл.с по каждому из углов.

5. Оценка точности характеризуется среднеквадратическими ошибками определения углов вращения вокруг осей приборной системы координат, значения которых приведены в табл. 4.

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОТРАБОТКИ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ДАТЧИКОВ

*Т.Ю. Дроздова, А.В. Никитин*

Институт космических исследований  
Российской академии наук, Москва

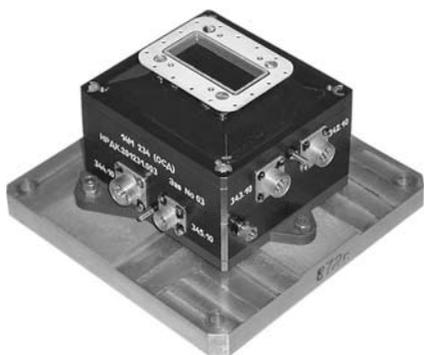
Сформулированы задачи наземной отработки приборов ОСД. Приведен краткий состав технических средств для наземной отработки приборов. Представлены результаты отработки штатных приборов, в том числе, измерены ошибки определения направления на источник света как в лабораторных условиях, так и при натуральных испытаниях, определены реальные поля зрения штатных приборов, исследовано влияние движения космического аппарата на точность измерений прибора ОСД.

Tasks of the optical solar sensor ground testing are stated. A brief list of technical facilities for the instrument ground testing is given. Results of the standard instruments testing including measurements of errors of determining direction towards the light source both in laboratory and during full-scale tests, determination of flight models' real fields of view and investigation of the s/c motion influence on the optical solar sensor measurement accuracy, are presented.

Оптический солнечный датчик (ОСД) (рис. 1), разработанный и изготовленный в ИКИ РАН, предназначен для определения параметров ориентации космического аппарата в поле зрения  $120 \times 60^\circ$  с точностью ( $3\sigma$ ) до 3 угл.мин.

Процесс разработки и испытаний включает наземную отработку прибора как в лабораторных условиях, так и при натуральных испытаниях. Наземная отработка приборов заключается:

- в проверке алгоритмов программного обеспечения прибора, в том числе:
  - функционирования прибора в соответствии с Протоколом информационного обмена;
  - работы алгоритмов прибора по полю зрения, включая работу прибора при имитации движения космического аппарата;
  - работы прибора в условиях натуральных испытаний;



**Рис. 1.** Оптический солнечный датчик, закрепленный на транспортной плите

- калибровке приборов и измерении матриц взаимной ориентации внутренней системы координат прибора во внешней системе координат;
- проведении климатических, термовакуумных, механических и других видов проверок прибора в соответствии с программами приемо-сдаточных, конструкторско-доводочных, ресурсных и граничных испытаний.

Наземная отработка позволяет проверить правильность конструкторских, схемотехнических и алгоритмических решений.

Для отработки оптического солнечного датчика в лабораторных условиях созданы контрольно-испытательная аппаратура (КИА ОСД) и стенд для геометрической калибровки и испытаний ОСД (СГКИ).

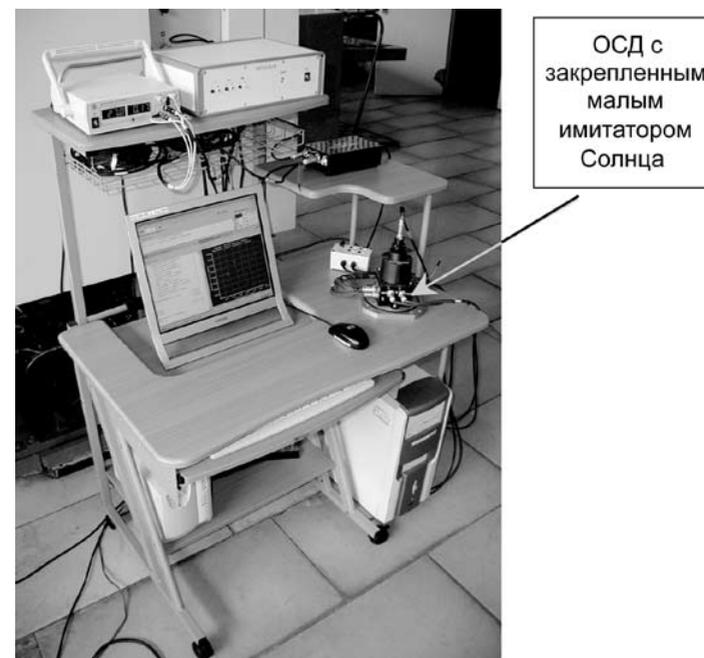
Проверка функционирования прибора в соответствии с Протоколом информационного обмена проводится с использованием КИА ОСД

В состав контрольно-испытательной аппаратуры ОСД входят:

- персональный компьютер, выполняющий роль имитатора бортовой вычислительной системы и позволяющий визуально контролировать измерения оптического солнечного датчика;

- источник питания — имитатор бортовой системы электроснабжения;
- блок коммутации питания и контроля;
- малый имитатор Солнца (ИС), позволяющий контролировать работу прибора при различных условиях окружающей среды.

Контрольно-испытательная аппаратура ОСД (рис. 2) предназначена для отработки программно-алгоритмического обеспечения прибора и взаимодействия с бортовой вычислительной системой (БВС) в соответствии с Протоколом информационного взаимодействия ОСД и БВС. КИА ОСД используется при проведении испытаний прибора как с использованием малого имитатора Солнца при различных условиях окружающей среды, так и при испытаниях прибора на стенде и на Солнце.



**Рис. 2.** Контрольно-испытательная аппаратура КИА ОСД

Прибор ОСД с закрепленным на нем малым имитатором Солнца подключается к контрольно-испытательной аппаратуре. В соответствии со штатной циклограммой работы ОСД в составе космического аппарата на прибор подается последовательность команд. Контроль массивов штатной и телеметрической информации, а также точности измерения прибором параметров направления на источник света проводится средствами КИА.

При отработке контролируются следующие параметры:

- состав принятых массивов штатной и телеметрической информации на соответствие Протоколу информационного обмена ОСД и БВС;
- значение параметров в каждом массиве на соответствие диапазону допустимых значений для наземной отработки (в том числе, проводится контроль и анализ правильности формирования битов кода состояния массива штатной информации ОСД при его работе на разных участках алгоритма: на этапе подбора времени экспонирования, на участке измерения направления на источник света, при работе с выключенным имитатором Солнца);
- предельная ошибка определения параметров направления на источник света и среднеквадратическое отклонение этих параметров.

Проверка работы алгоритмов прибора по полю зрения проводится с использованием стенда для геометрической калибровки и испытаний (СГКИ) и КИА ОСД.

Стенд для геометрической калибровки и испытаний ОСД состоит из стационарного имитатора Солнца и коллиматора, закрепленных на единой направляющей на поверхности оптического стола. В зависимости от решаемой задачи стенд собирается в конфигурации с использованием поворотного устройства или теодолита.

Стенд СГКИ ОСД позволяет выполнять следующие задачи:

- калибровку приборов;
- измерение матрицы взаимной ориентации внутренней системы координат прибора во внешней системе координат;

- проведение качественной и количественной оценки работы программно-алгоритмического обеспечения как в статическом, так и в динамическом состояниях прибора.

Контроль измерений, выполненных прибором при отработке на стенде СГКИ, осуществляется с помощью КИА ОСД.

Проверка работы алгоритмов прибора по полю зрения включает:

- проверку работы прибора со стационарным имитатором Солнца в статическом состоянии по полю зрения;
- измерение реального поля зрения прибора;
- проверку работы прибора на краю и за пределами поля зрения;
- проверку работоспособности ОСД при имитации движения космического аппарата, исследование влияния угловой скорости на границы поля зрения прибора;
- определение предельной ошибки измерения прибором направления на источник света.

Проверка работы прибора со стационарным имитатором Солнца в статическом состоянии по полю зрения проводится на стенде, собранном в конфигурации с поворотным устройством. На рис. 3 представлен макет оптического солнечного датчика, закрепленный на поворотном устройстве СГКИ.

С помощью приводов поворотного устройства изменяется взаимное положение ОСД и стационарного имитатора Солнца с дискретностью  $5^\circ$  в пределах поля зрения прибора. В каждой точке контролируется разброс углов направления на источник света, вычисленных прибором, и среднеквадратическое отклонение этих углов:

$$\sigma^2 = \frac{\sum \Delta^2}{n-1},$$

где  $\Delta$  — ошибка определения направления приборов;  $n$  — количество измерений.

На рис. 4 представлен трехмерный график зависимости предельной ошибки от углов направления на источник света,

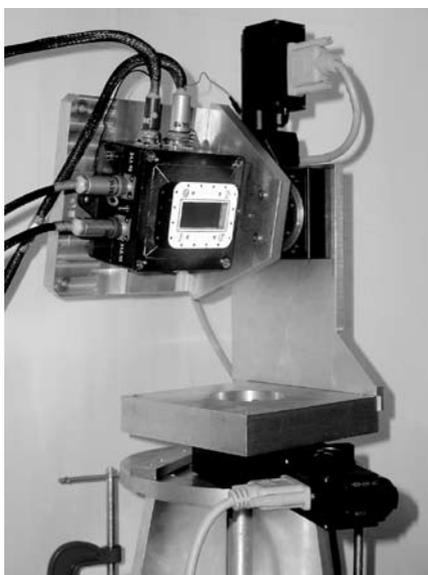


Рис. 3. Поворотное устройство СГКИ с закрепленным макетом прибора ОСД

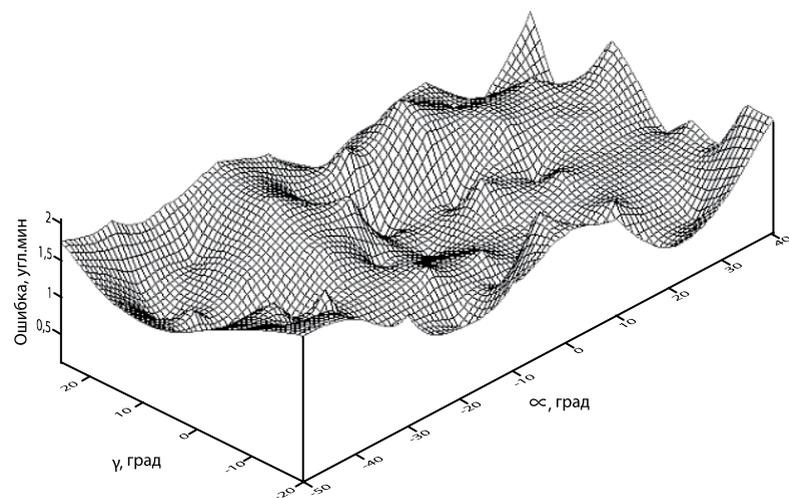


Рис. 4. Зависимость предельной ошибки от углов направления на источник света

полученный с одного из штатных приборов ОСД при обработке на стенде СГКИ. Форма графика отражает наличие как низкочастотной, так и высокочастотной составляющих.

Высокочастотная и низкочастотная составляющие обусловлены следующими факторами:

*Высокочастотная составляющая:*

- фотонным шумом излучения Солнца;
- неравномерностью темнового тока;
- шумом электронного тракта;
- наличием квантования по уровню сигнала (шум АЦП);
- случайными ошибками определения неравномерности чувствительности по ПЗС-линейке;
- фоновой засветкой.

*Низкочастотная составляющая:*

- возможной асимметричностью изображения на линейке;
- методической ошибкой, обусловленной пространственным квантованием;
- неэффективностью переноса заряда;
- неточностью изготовления элементов прибора (или измерения их параметров).

Полученные результаты показали, что предельная ошибка определения направления на источник света прибором ОСД не превышает 3 угл. мин.

Эти результаты были подтверждены при совместных исследованиях точностных характеристик прибора ОСД на стенде 331К в ФГУП «НПП «Геофизика-Космос».

Серии измерений в одной точке (рис. 5) и фиксация полученных параметров проводились неоднократно. Среднеквадратическое отклонение значений углов направления на имитатор Солнца, вычисленное при неизменном положении прибора, характеризует уровень углового эквивалента шума ОСД. Ни в одной серии измерений этот уровень не превысил 15 угл.с как для угла  $\alpha$ , так и для угла  $\gamma$ .

Проведена оценка точности работы прибора в различных точках поля зрения. Графики зависимости значения среднеквадратического отклонения (СКО) углов  $\alpha$  и  $\gamma$  от точки измерения на оси  $X$  и  $Y$  представлены на рис. 6 и 7.

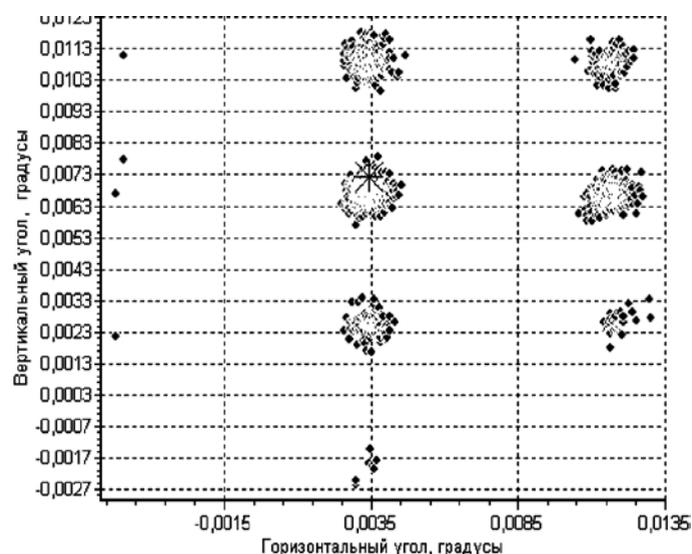


Рис. 5. Серия измерений углов направления на ИС в одной точке

Измерение поля зрения прибора ОСД и проверка его работы на краю и за пределами поля зрения проводится как в статическом, так и в динамическом режиме. В рамках решения этих задач исследуется также влияние угловой скорости и направления перемещения источника света (вход в

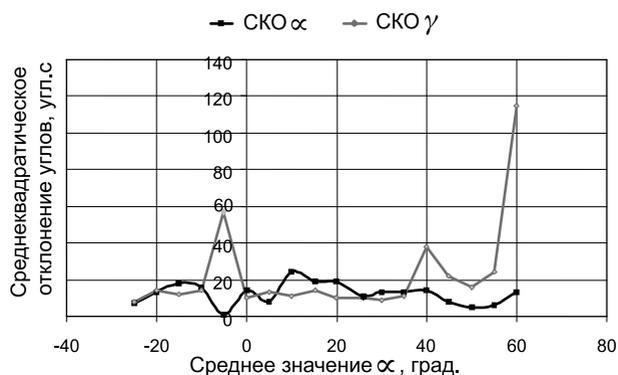


Рис. 6. Зависимость СКО углов  $\alpha$  и  $\gamma$  от среднего значения угла  $\alpha$

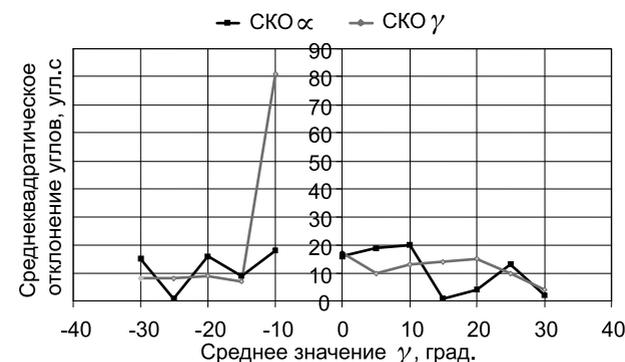


Рис. 7. Зависимость СКО углов  $\alpha$  и  $\gamma$  от среднего значения угла  $\gamma$

поле зрения/выход из поля зрения) на границы поля зрения, точность определения параметров направления в крайних точках поля зрения, а также работоспособность алгоритма подбора времени экспонирования на краю поля зрения и за его пределами.

Для проверки работоспособности ОСД при имитации движения космического аппарата поворотному устройству, на котором закрепляется прибор, посредством КИА задается угловая скорость, соответствующая требованиям технического задания. Траектория, полученная с помощью штатного прибора, при обработке в динамическом режиме, представлена на рис. 8. Скорости изменения положения прибора, при которых проводился съем данных, составляли 10 угл. мин/с и 1 град/с. Каждая точка графика соответствует измерению прибором параметров направления на имитатор Солнца в реальном времени.

Определение ошибки измерения прибором ОСД параметров направления на Солнце проводится на стенде, собранном в конфигурации с теодолитной подставкой. Проводится калибровка стенда. Затем прибор устанавливается на теодолитную подставку. Измеряется матрица взаимной ориентации прибора и подставки.

Измеренные прибором значения направления на источник света сравниваются с установленными на теодолите.

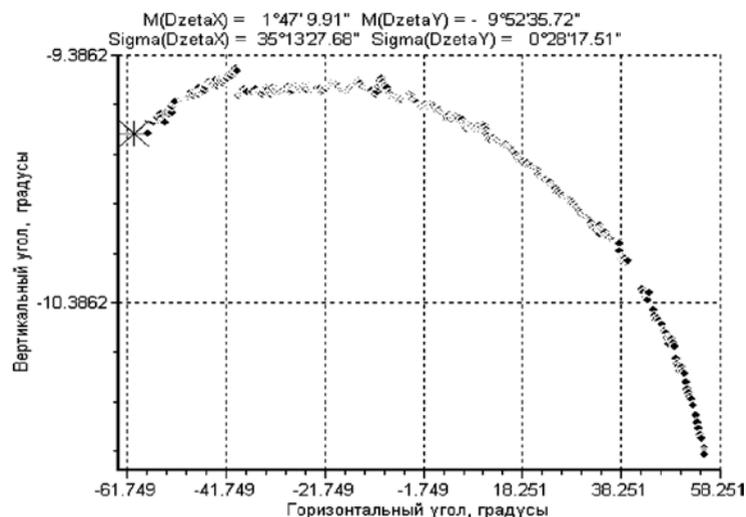


Рис. 8. Обработка ОСД, зав. № 03, в динамике. Скорость 10 угл.мин/с

По результатам измерений вычислены ошибки определения углов прибором направления на источник света при повороте вокруг осей  $X$  и  $Y$ . Результаты представлены в виде графиков на рис. 9 и 10.

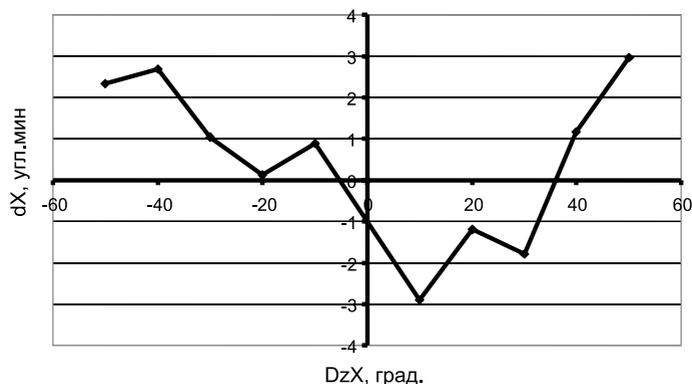


Рис. 9. Ошибка определения углов при повороте прибора вокруг оси  $X$

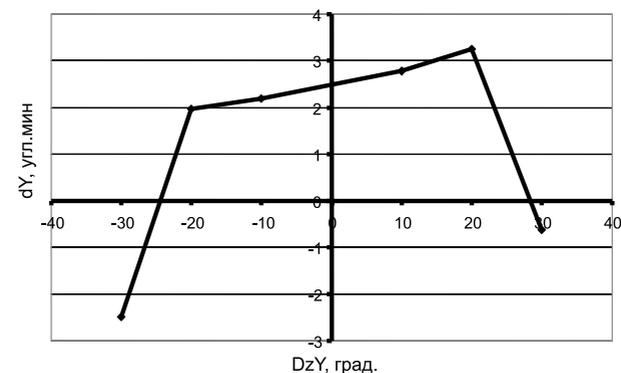


Рис. 10. Ошибка определения углов при повороте прибора вокруг оси  $Y$

Проверка работы прибора ОСД в условиях натуральных испытаний проведена на базе звездной лаборатории ОФО ИКИ РАН. Получена траектория движения Солнца в поле зрения прибора, а также проведен расчет ошибок определения направления прибором. Измерения параметров направления проводятся прибором в темпе движения Солнца по небесной сфере. На рис. 11 и 12 представлены траектории движения Солнца в поле зрения прибора и график ошибок проведенных измерений.

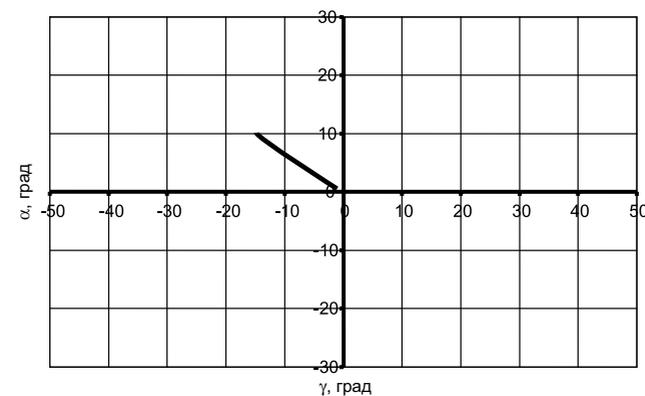


Рис. 11. Траектория движения Солнца в поле зрения прибора ОСД

