

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ДАТЧИКА

Т.Ю. Дроздова, И.Ю. Катасонов, А.В. Никитин

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Рассмотрены физико-технические принципы построения солнечного прибора, а также алгоритм и математические основы его программного обеспечения. Дано общее описание системной и прикладной частей программного обеспечения. Системная часть предназначена для экспонирования с заданным временным интервалом, считывания ПЗС-линейки и записи ее в память процессора, а также трансляции полученных результатов в память микросхемы интерфейса мультиплексного канала. С помощью прикладных программ выполняется обработка цифрового изображения, вычисление оптимального времени экспонирования, расчет направления на Солнце, расчет вектора угловой скорости и формирование выходных переменных в памяти процессора. Рассматриваются вопросы геометрической калибровки прибора и принципы взаимодействия бортовой вычислительной системы с прибором.

Both physical and technical principles of the solar sensor design as well as the mathematical grounds of its software are considered. General description of this software parts — system and applied, is given. The system programs are destined for exposure with the given time interval, CCD data readout and its writing in the processor memory and the obtained results translation to the memory of the multiplex channel interface chip. The applied programs provide for processing a digital image, calculating exposure time, direction towards the Sun, angular velocity vector as well as the output variables forming in the processor memory. The instrument geometrical calibration and principles of interacting the on-board computer and the instrument are considered.

Принципы работы солнечного датчика с ПЗС-линейкой

Оптический солнечный датчик (ОСД) предназначен для определения направления на центр видимого диска Солнца в приборной системе координат. В солнечном датчике в качестве приемника излучения используется ПЗС-линейка. Каждый элемент с зарядовой связью преобразует излучение Солнца в аналоговый сигнал. Цифровая обработка элементов ПЗС-линейки позволяет определять искомое направление.

По принципу построения такой датчик можно отнести к датчикам с кодирующей маской. ОСД имеет широкий угол поля зрения $120 \times 60^\circ$ и достаточно высокую точность — среднеквадратическое отклонение погрешности определения направления на Солнце составляет 1 угл. мин.

Таким образом, ОСД сочетает в себе преимущества датчиков точной ориентации — минутную точность и датчиков грубой ориентации — широкое поле зрения.

Оптический солнечный датчик включает следующие составные части: оптический элемент, ПЗС-линейку, аналого-цифровой преобразователь, сигнальный процессор, устройство интерфейса и источник вторичного электропитания. Принцип работы прибора проще изложить, опираясь на модель датчика с кодирующей маской, состоящей из трех щелей.

В оптическом элементе имеются три щели, расположение которых показано на рис. 1, при этом крайние щели образуют с центральной щелью угол 45° . Поверхность оптического элемента и центральная щель задают внутреннюю систему координат солнечного датчика.

Солнечное излучение, проходя через оптический элемент, формирует изображение трех щелей на чувствительной поверхности ПЗС-линейки. По положению центральной группы щелей на ПЗС-линейке относительно центрального пиксела линейки можно определить угол Солнца в плоскости OZX (рис. 2), по расположению изображений крайних

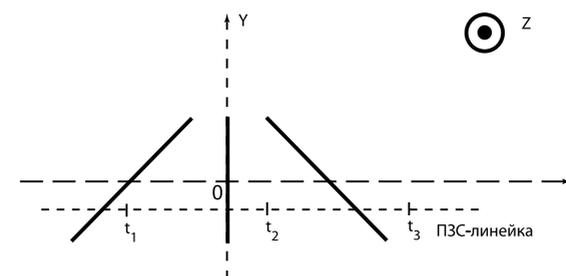


Рис. 1. Расположение щелей оптического солнечного датчика: t_1 , t_2 , t_3 — координаты энергетических центров изображений трех щелей кодирующей маски

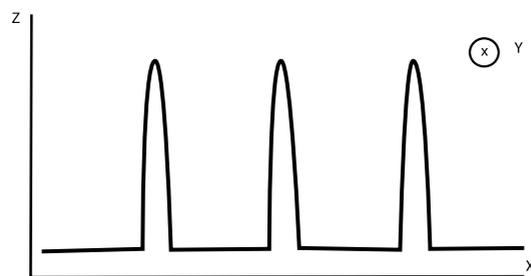


Рис. 2. Изображение щелей на ПЗС-линейке

щелей относительно изображения центральной щели можно определить угол Солнца в плоскости OZY .

В принципе, для определения направления на Солнце достаточно изображений щелей одной крайней и центральной группы, но для увеличения угла поля зрения используют три щели.

Далее изображение с ПЗС-линейки квантуется с помощью 8-разрядного АЦП и записывается в память сигнального процессора. Процессор вычисляет направления на Солнце и передает полученную информацию в бортовой вычислительный комплекс КА.

Существенным недостатком прибора с тремя щелями является его низкая помехозащищенность — искажение центральной щели при изготовлении маски может привести к потере ориентации ОСД.

Оптический солнечный датчик с использованием ПЗС-линейки и кодирующей маски обладает высокими точностными характеристиками и широким углом поля зрения при относительной простоте аппаратных средств. Два угла направления на Солнце ε_x и ε_y рассчитываются по следующим формулам:

$$\varepsilon_x = \operatorname{arctg} \frac{t_2}{f}; \quad \varepsilon_y = \operatorname{arctg} \frac{(t_1 + t_3) - 2t_2}{2f},$$

где f — расстояние от кодирующей маски до ПЗС-линейки; t_1, t_2, t_3 — абсцисса центров изображения щелей.

Объектами, влияющими на работоспособность ОСД при эксплуатации на борту космического аппарата (КА), являются

частицы, подсвеченные Солнцем и протоны, образованные при солнечной вспышке на Солнце. Эти объекты могут привести либо к значительным погрешностям в определении углового положения Солнца, либо к потере ориентации. Сохранение точности вычислений может быть достигнуто отбраковкой координаты центра искаженного изображения щели при расчете направления на Солнце. В трехщелевом варианте ОСД искажение изображения центральной щели может привести к потере ориентации солнечным датчиком. Таким образом, возникает необходимость повысить помехозащищенность прибора. В разрабатываемом варианте ОСД помехозащищенность достигается путем резервирования щелей маски. Дополнительные щели приводят, однако, к усложнению математического обеспечения ОСД. Простое дублирование ведет к неоднозначной идентификации изображений щелей, поэтому для повышения помехозащищенности используется принцип троирования щелей. Следует отметить, что расстояние между щелями должно быть достаточным для разделения изображений щелей при высокой угловой скорости движения КА.

В разрабатываемом образце ОСД девять щелей объединены в три группы. Крайние группы щелей образуют с центральной группой угол 45° , как показано на рис. 3.

При этом прибор будет сохранять свою работоспособность, если изображения, как минимум, двух щелей в двух

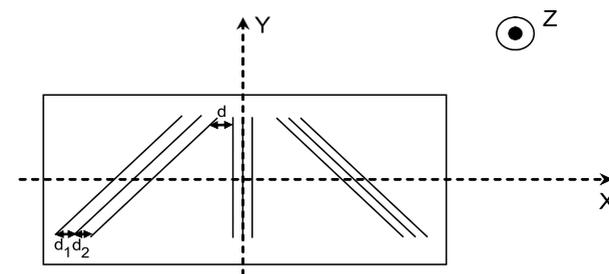


Рис. 3. Расположение щелей девятищелевого датчика: d — минимальное расстояние между группами щелей; d_1 — расстояние между левой и центральной щелями в группе; d_2 — расстояние между центральной и правой щелями в группе

группах не являются «испорченными». Под «испорченными» изображениями понимаются изображения щелей, не удовлетворяющие ограничениям по ширине и амплитуде.

Для вычисления направления на Солнце необходимо идентифицировать как группы, так и щели внутри групп.

Основные этапы работы прибора при расчете направления на Солнце

Алгоритм солнечного датчика позволяет определять направление на Солнце при работе с троированной маской, содержащей 9 щелей. Данный алгоритм реализован программным обеспечением сигнального процессора ОСД. Функциональная схема ОСД приведена на рис. 4.

Обработка изображений ПЗС-линейки и определение направления на Солнце включают следующие этапы:

- экспонирование;
- первичная обработка изображений ПЗС-линейки;
- выделение кластеров и их обработка;
- отождествление кластеров;
- расчет направления на Солнце;
- расчет вектора угловой скорости;
- передача параметров, вычисленных прикладной частью программного обеспечения, в интерфейс мультиплексного канала обмена.

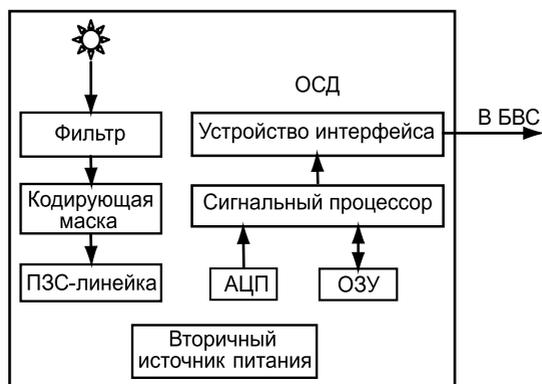


Рис. 4. Функциональная схема ОСД

Экспонирование ПЗС-линейки выполняется с целью получения цифрового изображения, пропорционального освещенности, создаваемой солнечным излучением видимого диапазона. Для подбора оптимального сигнала, при котором достигается наилучшая точность определения направления на Солнце, осуществляется автоматический подбор времени накопления заряда. Чтобы из цифрового сигнала выбрать элементы ПЗС-линейки, содержащие изображения щелей кодирующей маски, выделяются и обрабатываются кластеры. Для определения соответствия кластеров щелям кодирующей маски, отбраковки «испорченных» щелей и вычисления координат центров групп выполняется отождествление кластеров и разбиение по группам. Далее по средней щели в группе вычисляется направление на Солнце, направляющие косинусы которого по мультиплексному каналу передаются в бортовую вычислительную систему КА.

Функции системной части программного обеспечения ОСД

К функциям системной части программного обеспечения ОСД относятся:

- экспонирование ПЗС-линейки по внешней команде;
- считывание информации с ПЗС-линейки в память сигнального процессора;
- формирование массивов штатной и телеметрической информации прибора.

После приема внешней команды на запрос данных о солнечной ориентации устанавливается шестнадцатеричное начальное значение или значение кода времени экспонирования, сформированное прикладной частью программного обеспечения на предыдущем такте работы.

По истечении заданного времени экспонирования сигналы с ПЗС-линейки с частотой 500 кГц поступают на вход 8-разрядного АЦП и затем записываются в память сигнального процессора.

Далее работает прикладная часть программного обеспечения, которая вычисляет координаты вектора направления на Солнце в приборной системе координат.

Затем формируются выходные и телеметрические массивы прибора.

Сформированные массивы записываются в память мультиплексного канала обмена.

Указанные массивы передаются в БВС по чтению заданного подадреса оконечного устройства (ОУ) в мультиплексном канале обмена (МКО).

Экспонирование и первичная обработка изображений ПЗС-линейки

Выполняется экспонирование ПЗС-линейки открыванием электронного затвора в течение установленного сигнальным процессором времени накопления заряда. Затем аналоговый сигнал элементов ПЗС-линейки оцифровывается восьмиразрядным АЦП (рис. 5). Далее квантованные значения яркости элементов ПЗС-линейки считываются в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) модуля процессора ОСД. В процессе первичной обработки определяется максимальный уровень сигнала G_{\max} ПЗС-линейки. Этот уровень ис-

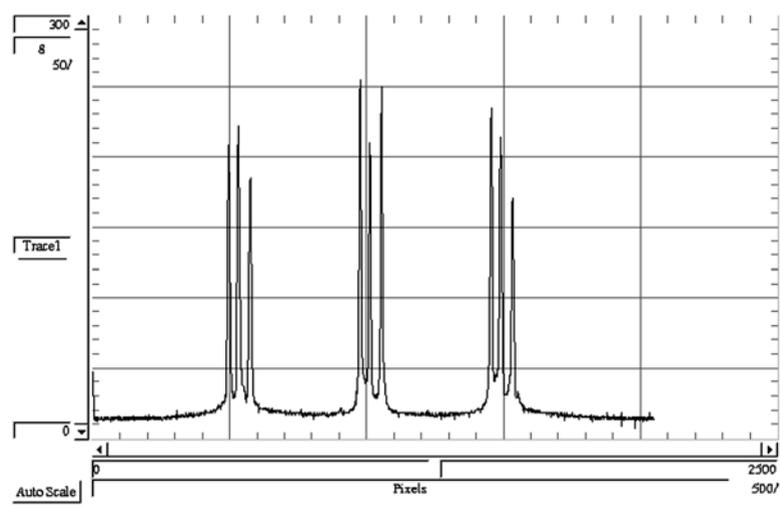


Рис. 5. Изображение сигнала ПЗС-линейки

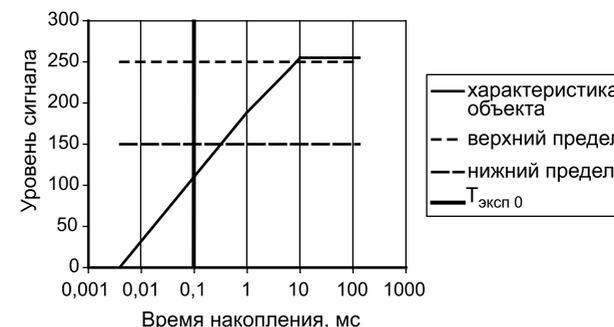


Рис. 6. Зависимость максимального уровня цифрового сигнала от времени накопления

пользуется для определения оптимального времени экспонирования в случае, если он выходит за пределы номинальных значений (от 150 до 250 градаций АЦП) (рис. 6).

При этом, если разность между значением g_{\max} и средней яркостью при максимально возможном времени экспозиции 131 мс ниже 20 градаций АЦП, то устанавливается бит «сигнал отсутствует», и вычисления направления не проводятся.

Пороговое значение устанавливается таким, чтобы в дальнейшую обработку принимались только элементы изображений щелей.

Выделение кластеров и их обработка

На этом этапе выполняется группировка элементов ПЗС-линейки по кластерам, которые определяются как последовательность элементов со значением сигнала выше уровня порога. Чтобы избежать фиксации шумовых объектов на изображении кластер принимается к дальнейшей обработке, если он содержит не менее 7 и не более 30 элементов, а также, по крайней мере, на 20 градаций превышает уровень пороговой отсечки. Для каждого кластера вычисляются следующие характеристики: координата его энергетического центра, ширина и максимальное значение сигнала в кластере. Эти характеристики используются для дальнейшего анализа и отождествления кластеров.

Отождествление кластеров

Отождествление кластеров выполняется с целью установления соответствия между координатами энергетических центров кластеров и порядковыми номерами щелей на кодирующей маске. Оно включает следующие процедуры: поиск групп кластеров, идентификация кластеров в каждой группе, идентификация групп, отбраковка кластеров и вычисление координат центров групп.

Поиск групп кластеров

По взаимным расстояниям между центрами кластеры разбиваются на группы, исходя из условия, что, если минимальное расстояние между центрами кластеров в группе больше 1,2 мм, то открывается новая группа. В случае нахождения только одной группы кластеров прибор сигнализирует об отсутствии Солнца в поле зрения ОСД и завершении текущего измерения.

Идентификация кластеров в каждой группе

Кластеры в группе идентифицируются по взаимным расстояниям между центрами соседних кластеров с использованием заданных ограничений.

Описанный подход гарантирует однозначную идентификацию кластеров в группе, даже когда один из трех кластеров оказывается «испорченным». Если группа состоит из одного кластера, то она не рассматривается при дальнейшей обработке.

В результате идентификации кластеров составляется матрица идентификации размером 3×3 , которая заполняется в порядке обработки кластеров. Строка матрицы соответствует номеру группы, а столбец — порядковому номеру кластера в группе. Номер обрабатываемого кластера помещается в соответствующий элемент матрицы идентификации в зависимости от условия идентификации.

Пример матрицы идентификации:

1 2 3	1 2 3	0 0 0
4 5 6	4 5 6	1 2 3 .
7 8 9	0 0 0	4 5 6

Идентификация групп

Идентификация групп выполняется с целью уточнения порядка групп в матрице идентификации. Если Солнце находится в центре поля зрения, то на ПЗС-линейке появляются изображения трех групп кластеров. Координаты энергетических центров кластеров в этом случае могут быть при помощи матрицы идентификации однозначно соотнесены с группами щелей кодирующей маски.

При наличии двух групп, которые появляются при нахождении Солнца на краю поля зрения, возникает неоднозначное соответствие. Для того чтобы прояснить ситуацию, необходимо сравнивать ширину кластеров в группе. Центральной группе щелей соответствует группа сигналов с наименьшими размерами кластеров. При этом оставшаяся группа сигналов отождествляется однозначно.

Вычисление координат центров групп

На этом шаге выполняется переход от измерений девятищелевого датчика к модели трехщелевого датчика. В каждой группе щелей по координатам энергетических центров кластеров вычисляются координаты энергетического центра среднего кластера группы, а также по абсциссам идентифицированных щелей вычисляется абсцисса средней щели в группе. Указанные вычисления проводятся на основе матрицы идентификации.

Расчет направления на Солнце

Расчет направления на Солнце основан на математическом описании хода лучей в модели датчика (рис. 7). При движении Солнца вдоль оси OX координаты центров щелей смещаются вдоль ПЗС-линейки на определенное расстояние от ее центра. По этому расстоянию можно вычислить угол направления на Солнце в плоскости OZX . При движении Солнца вдоль оси OY координаты центров щелей крайних групп смещаются на определенное расстояние от координат энергетических щелей центральной группы. По этому расстоянию можно вычислить угол направления на Солнце в плоскости OZY . При вычислениях учитывается взаимное положение кодирующей маски и ПЗС-линейки, определенное

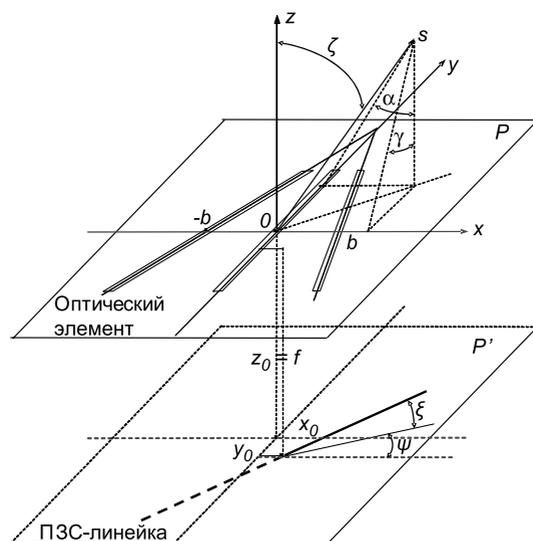


Рис. 7. Схема определения направления на Солнце

при геометрической калибровке ОСД, а также преломление в стекле ПЗС-линейки.

Далее рассчитывается направление на Солнце в системе координат посадочного места с учетом матрицы ориентации внутренней системы координат в системе координат посадочного места:

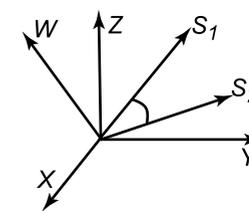
$$\begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix}_{\text{ВСК}} = \begin{pmatrix} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \gamma + 1}} \\ \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \gamma + 1}} \\ 1 \end{pmatrix},$$

где l, m, n — направляющие косинусы вектора Солнца; α, γ — углы в плоскости Oxz и Oyz (см. рис. 7).

Расчет вектора угловой скорости

Расчет составляющих угловой скорости выполняется по двум измеренным направлениям на Солнце, при этом фикс-

Рис. 8. Схема вычисления угловой скорости ОСД: W — направление вектора угловой скорости, S_1 — орт Солнца в первый момент времени, S_2 — во второй момент времени



сируется время измерений (рис. 8). Вычисляется скалярное произведение двух направлений, а также результат их векторного произведения. Нормированный результат векторного произведения является осью вращения, а результат скалярного произведения — углом поворота. Разделив значения угла поворота на интервал между измерениями, получим угловую скорость. Произведение значения угловой скорости на направляющие косинусы оси вращения определяют компоненты угловой скорости.

Геометрическая калибровка ОСД

Геометрическая калибровка прибора выполняется с целью определения следующих конструктивных параметров прибора (см. рис. 7), которые используются при вычислении направления на Солнце:

- азимутальный угол разворота ПЗС-линейки;
- угол наклона ПЗС-линейки;
- координаты середины ПЗС-линейки во внутренней системе координат x_0, y_0, f ;
- углы наклона крайних щелей к центральной.

Эти параметры используются при расчете направления на Солнце во внутренней системе координат прибора.

Для определения конструкторских параметров ОСД используется стенд геометрической калибровки и испытаний. В состав стенда входят теодолит и квадрант, коллиматор и имитатор Солнца.

На этапе измерений при геометрической калибровке прибора проводится поворот стенда (рис. 9) вокруг вертикальной и горизонтальной осей на заданные углы. Поворот вокруг горизонтальной оси проводится в диапазоне $\pm 30^\circ$ с шагом 5° .

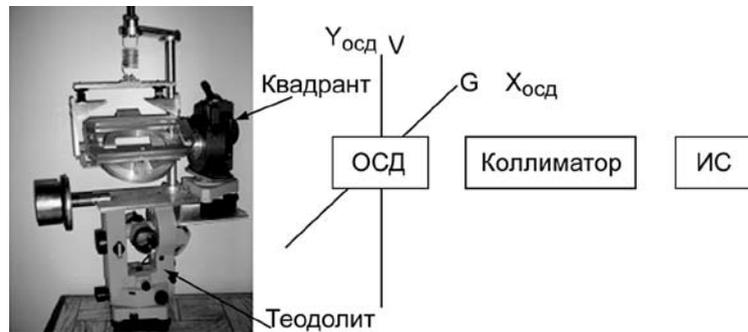


Рис. 9. Поворотная система и схема стенда геометрической калибровки

Поворот вокруг вертикальной оси проводится в диапазоне $\pm 60^\circ$ с шагом 10° .

Горизонтальный угол (γ_r) снимается с отсчетного устройства горизонтального круга теодолита, а вертикальный угол (γ_b) — с отсчетного устройства квадранта.

После установки на заданный угол средствами контрольно-испытательной аппаратуры ОСД фиксируются координаты локализованных объектов с ОСД в памяти компьютера.

После измерений на стенде фиксируются 144 измерения с прибора и стенда.

В ходе обработки результатов измерений по координатам энергетических центров изображений звезд рассчитываются углы направления на Солнце ($S_{\text{ОСД}}$), которые измерил бы прибор с заданными конструктивными параметрами. Основным условием является определение точек пересечения плоскости, образованной направлением на Солнце и направлением щели оптического элемента, с осью ПЗС-линейки:

$$S_{\text{ОСД}} = \begin{pmatrix} \text{tg}\alpha \\ \text{tg}\gamma \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Направление на имитатор Солнца ($S_{\text{ст}}$) в системе координат стенда определяется исходя из поворота прибора вокруг осей стенда на заданные углы:

$$S_{\text{ст}} = M_{\text{rot}}(\gamma_r, r_b) M_{\text{rot}}(\gamma_b, r_r) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

где $M_{\text{rot}}(\alpha, r)$ — матрица поворота на угол α вокруг оси r ; r_b — направляющие косинусы вертикальной оси вращения; r_r — направляющие косинусы горизонтальной оси вращения.

При определении геометрических параметров прибора задаются начальные приближения калибровочных параметров: $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $f = 7,5$ мм, $\psi = 0$ и $\xi = 0$, которые впоследствии уточняются.

Определяется угол $F = \frac{S_{\text{ст}} S_{\text{ОСД}}}{\|S_{\text{ОСД}}\|}$ между двумя направлениями для каждого измерения.

Всего составляется 144 уравнения неявной функции с 11 неизвестными, которые решаются по способу наименьших квадратов методом последовательных приближений.

При уточнении системы определяются искомые геометрические параметры и четыре угла, задающие направления осей вращения стенда (r_r и r_b).