

Математическая модель солнечного датчика ориентации на основе фотодиодов

Г. А. Аванесов, Б. С. Жуков, А. В. Никитин

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru*

Основанные на фотодиодах солнечные датчики ориентации широко применяются в космической технике начиная с середины семидесятых годов прошлого века и имеют множество конструктивных воплощений. В настоящей статье приводится описание математической модели солнечного датчика на основе одиночных фотодиодов, расположенных на гранях и верхнем основании трёх-, четырёх- и шестигранных правильных усечённых пирамид. Модель предполагает, что данные от каждого фотодиода оцифровываются и обрабатываются современным микропроцессорным устройством. Модель рассчитывает ключевые параметры прибора по заданному расположению фотодиодов и их характеристикам, а также с учётом оптических элементов, формирующих диаграмму чувствительности и поле зрения каждого из них. К числу таких элементов относятся: защитное стекло перед каждым фотодиодом, его микробленда, апертурная диафрагма и рассеивающее стекло. На основании этих данных рассчитывается создаваемая Солнцем освещённость на фотодиодах при различных углах визирования. Заложенная в модель программа определяет поле зрения прибора, вычисляет углы направления на Солнце, оценивает точность измерения и отображает полученные результаты. В программе рассчитываются следующие величины: углы между направлением на Солнце и осями чувствительности фотодиодов, функция зависимости напряжения на фотодиодах от угла между их осями чувствительности и направлением на Солнце. Полученные значения напряжения с учётом шумов используются для расчёта направляющих косинусов вектора Солнца во внутренней системе координат прибора. В качестве уравнения для расчёта направления на Солнце используется разность между измеренным и вычисленным значением напряжения. Полученная для всей совокупности фотодиодов система уравнений решается методом последовательных приближений по способу наименьших квадратов. Решением системы становятся углы направления на Солнце. Результаты вычислений сравниваются с заданными в программе значениями, что позволяет определить величину ошибки измерения. При наличии текстовых файлов с записью реальных измерений программа может выполнять их обработку и оценивать полученные результаты.

Ключевые слова: Солнце, ориентация, фотодиод, аналоговый сигнал, система координат, бленда, апертурная диафрагма, сигнал/шум, цифровое накопление

Одобрена к печати: 10.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-89-97

Введение

С начала 70-х гг. прошлого века в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) было создано несколько поколений солнечных датчиков (СД) ориентации. Сначала это были двухкоординатные приборы на основе фотодиодов (ФД) с аналоговой обработкой данных. Позднее, в 1980-х гг., фотодиоды использовались в проекте «Вега» в приборе «Аналоговый датчик наведения» (АДН). Прибор вошёл в состав платформенного комплекса космического аппарата (КА) «Вега» в качестве резервного инструмента для наведения платформы с научными приборами на ядро кометы Галлея. В качестве чувствительного элемента в нём использовался квадрантный 8-площадочный фотодиод, разработанный и изготовленный в Физико-техническом институте имени академика А. Ф. Иоффе. В 1986 г. АДН прекрасно справился со своей задачей при пролёте КА «Вега-2» мимо ядра кометы Галлея. Сигналы, получаемые с площадок фотодиода, обрабатывались на борту аналоговыми средствами (Аванесов и др., 1989).

Затем, в середине 1990-х гг., в ИКИ РАН был разработан полностью цифровой солнечный датчик ориентации на основе ПЗС-линейки (прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD —

Charge-Coupled Device) и кодирующей маски. Полученная в нём случайная погрешность измерений при поле зрения $60 \times 120^\circ$ составила около $3'$, что вполне приемлемо для большинства применений. Прибор несколько раз модернизировался и выпускается до сих пор (Аванесов и др., 2003).

В последнее десятилетие в ИКИ РАН были разработаны и исследованы солнечные датчики на основе КМОП-матриц (комплементарная структура «металл-оксид-полупроводник», *англ.* CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) с объективами Pinhole и Fisheye. Достигнутая в них случайная погрешность измерения составила около $1'$, что более чем достаточно для приборов данного типа. Высокие показатели по точности измерений в этих приборах достигнуты благодаря использованию цифровой обработки данных.

Возникает естественный вопрос: что может дать цифровая обработка данных в солнечных датчиках ориентации на основе фотодиодов? Поскольку к настоящему времени достаточно высокое развитие получили методы цифрового моделирования, в настоящей работе предлагается математическая модель солнечного датчика на основе фотодиодов (ФСД) и выполненная с её помощью оценка выходных параметров прибора. Забегая вперёд, отметим, что моделирование солнечного датчика на фотодиодах с помощью описываемой в статье программы позволяет получить точность измерения направления на Солнце порядка $3'$ при поле зрения $60 \times 120^\circ$. То есть примерно такую же точность, что и в приборах на ПЗС-линейках в сочетании с кодирующей маской.

Из большого многообразия конструкций солнечных датчиков на фотодиодах (Аванесов и др., 2008) для моделирования был выбран вариант, в котором одиночные фотодиоды размещаются на внешних или внутренних гранях правильных усечённых пирамид, как это показано на *рис. 1*.

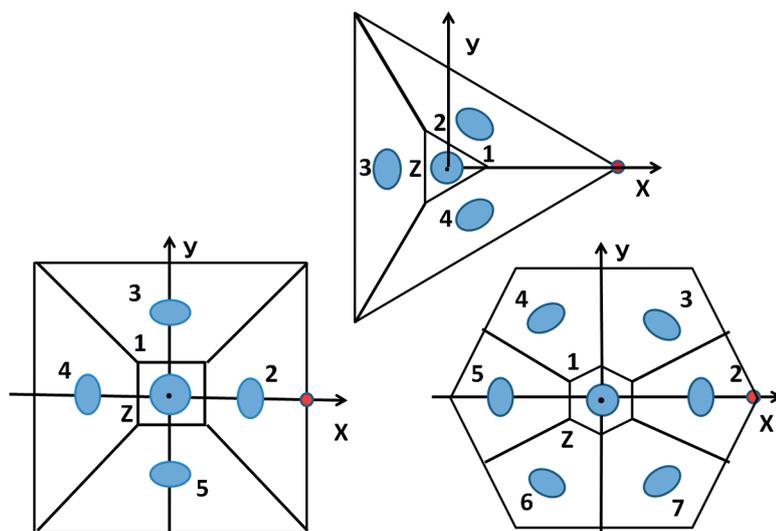


Рис. 1. Варианты пирамидальных оптических головок солнечных датчиков ориентации на основе одиночных фотодиодов

Как видно на *рис. 1*, в схему размещения фотодиодов была введена некоторая избыточность: добавлен фотодиод на верхнее основание каждой пирамиды. Во всех вариантах пирамид ему присвоен номер 1. Красной точкой на рисунке показан ключ, от которого идёт отсчёт номеров фотодиодов в модели.

Каждый фотодиод снабжён оснасткой, показанной на *рис. 2* (см. с. 91). Предохраняющее от радиации защитное стекло вставлено в бленду, формирующую поле зрения фотодиода. В её нижней части находится апертурная диафрагма. За ней следует молочное стекло, обеспечивающее рассеянное пропускание света. Все перечисленные элементы образуют «оптический элемент» головки солнечного датчика.

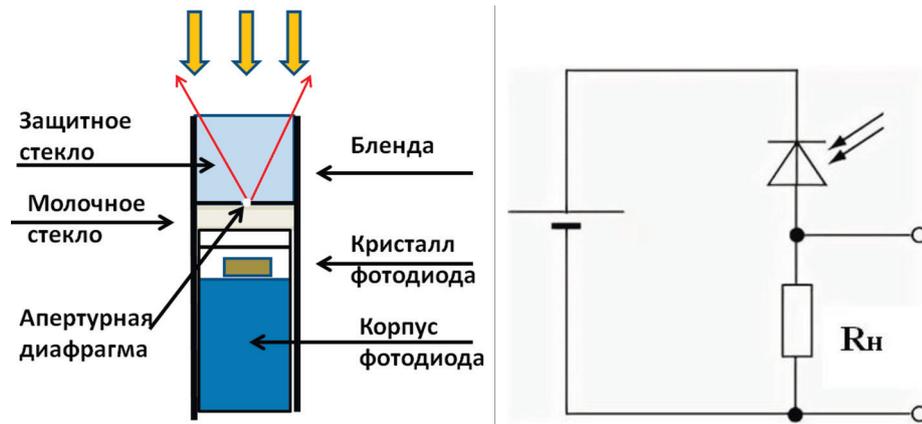


Рис. 2. Оптический элемент прибора и схема его включения

При падении солнечного света освещённостью E на молочное стекло с коэффициентом пропускания τ свет после рассеяния попадает на фоточувствительную площадку фотодиода, и на нагрузочном резисторе R_n возникает напряжение U . Его величина зависит от чувствительности фотодиода S и угла между направлением оси чувствительности фотодиода и направлением на Солнце в системе координат (СК) оптического элемента.

С нагрузочного сопротивления R_n снимается аналоговое напряжение, пропорциональное косинусу угла между направлением на Солнце и осью чувствительности. После аналого-цифрового преобразования цифровой отклик в градациях АЦП (B) с каждого оптического элемента может быть рассчитан следующим образом:

$$B = 2^{12} \frac{U}{U_{\text{оп}}}$$

где $U_{\text{оп}}$ — опорное опережение АЦП.

Приборная система координат. Прибор солнечной ориентации предназначен для определения направления на Солнце в приборной системе координат (рис. 3): ось Z направлена перпендикулярно посадочной плоскости прибора; ось X — вдоль линии, соединяющей центры «классный паз» и «классное отверстие»; ось Y дополняет систему координат до правой тройки векторов.

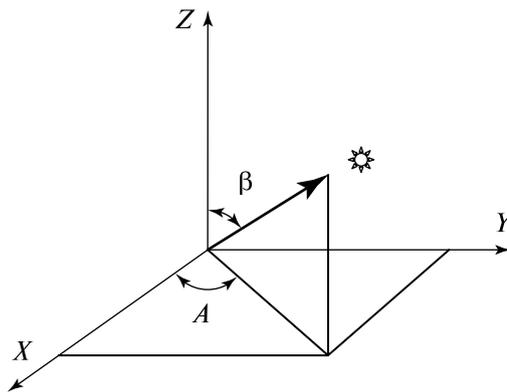


Рис. 3. Направление на Солнце в приборной системе координат прибора

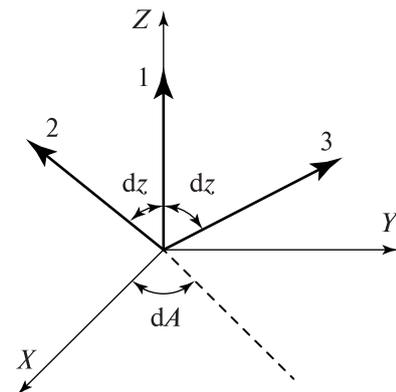


Рис. 4. Принцип размещения осей чувствительности элементов в солнечном приборе

Внутренняя система координат. Ось Z направлена вдоль оси чувствительности центрального датчика; ось X — под углом 90° к оси Z по направлению второго фотодиода; ось Y дополняет систему координат до правой тройки векторов.

Направление на Солнце определяется двумя углами: вертикальным углом β и азимутом A . Вертикальный угол отсчитывается от направления оси Z до направления на Солнце. Азимут отсчитывается в горизонтальной плоскости (XY) от направления оси X до проекции на горизонтальную плоскость внутренней системы координат прибора. Солнечный прибор состоит из нескольких фотодиодов, по крайней мере трёх, позволяющих определить направление на Солнце.

При расположении осей чувствительности оптических элементов применяется следующий подход. Задаются вертикальные и горизонтальные углы каждой оси чувствительности фотодиода. На *рис. 4* представлено расположение осей чувствительности трёх оптических элементов. Первый оптический элемент располагается вдоль оси Z прибора. Ось второго элемента расположена в плоскости ZX , при этом угол между осью Z и осью чувствительности элемента (dz) — вертикальный параметр данной схемы. Горизонтальный угол между проекциями осей чувствительности третьего и второго элемента dA — это второй параметр схемы размещения элементов в приборе. Угол между осью i -го оптического элемента и осью X может быть вычислен следующим способом:

$$A_i = (i - 2)dA, \text{ при этом } i = 2, \dots, n,$$

где n — количество оптических элементов. Угол между осями чувствительности элементов и осью Z для всех элементов, кроме первого, составляет величину, равную второму параметру схемы размещения dz .

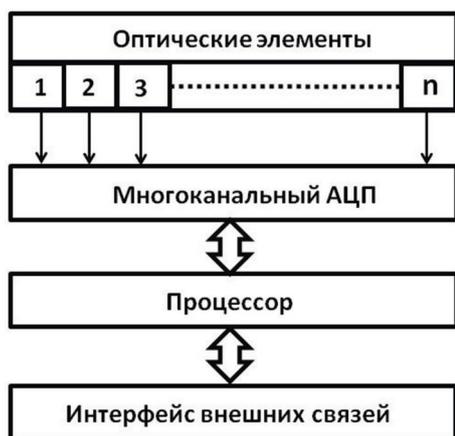


Рис. 5. Обобщённая функциональная схема солнечного датчика ориентации

Прибор солнечной ориентации состоит из нескольких оптических элементов, каждый из которых формирует уровень напряжения, пропорциональный освещённости падающего излучения, зависящей от угла между направлением на Солнце и направлением оси чувствительности оптического элемента. Укрупнённая функциональная схема прибора показана на *рис. 5*. Напряжение с каждого из элементов квантуется при помощи многоканального аналого-цифрового преобразователя и поступает в память процессора. По полученному напряжению с учётом калибровочных функций оптических элементов в процессоре проводится вычисление направления на Солнце.

Освещённость на фотодиодах определяется углом визирования Солнца, диаметром апертурной диафрагмы, коэффициентами пропускания и светорассеяния молочного стекла. По предварительным расчётам, она будет лежать в пределах от 2500 до 4000 люкс.

В планируемом к применению процессоре имеются 12-разрядные аналого-цифровые преобразователи со временем преобразования 10 мкс. При этом время последовательного опроса всех пяти фотодиодов оптической головки составит 50 мкс. К приборам солнечной ориентации, как правило, предъявляется требование сохранять точность измерения при скорости углового движения КА не выше 10 град/с. Соответственно, на процесс измерения можно отвести время существенно большее, чем 50 мкс. В связи с этим, а также с целью повышения отношения сигнал/шум в модели предусмотрено применение цифрового накопления с числом шагов не менее 16. При этом время измерения составит 800 мкс.

Расчёт направления на Солнце

На момент проведения измерения солнечным прибором на вход процессора поступает сигнал от нескольких оптических элементов. Радиус-вектор на Солнце вычисляется по горизонтальному и вертикальному углу в связанной системе координат α_s и β_s :

$$r_S = \begin{pmatrix} \cos \alpha_S \cdot \cos \beta_S \\ \sin \alpha_S \cdot \cos \beta_S \\ \sin \beta_S \end{pmatrix}$$

Направления осей чувствительности каждого оптического элемента хранятся в памяти процессора прибора и определяются двумя углами: $\alpha_{ФД}$, $\beta_{ФД}$. Также задаются матрицы перехода от внутренней системы координат прибора к системе координат оптического элемента.

Система координат оптического элемента (рис. 6) определяется следующим способом: ось Z направлена по направлению его оси чувствительности; ось Y располагается по нормали между осью Z внутренней системы координат прибора и осью Z оптического элемента. Ось X дополняет систему координат до правой тройки векторов.

Для каждого оптического элемента определяется массив значений напряжений U_i . Индекс массива определяется углом между осью $Z_{ФД}$ и направлением на Солнце.

По приближенным значениям углов направления на Солнце вычисляются направления в СК оптических элементов через матрицы направляющих косинусов по формуле:

$$r_{ФД} = M_{ФД}^{СД} r_S.$$

Угол между осью Z оптического элемента и вектором $r_{ФД}$ вычисляется как арккосинус аппликаты вектора $r_{ФД}$.

Полученный угол в градусах является аргументом массива напряжений (Аванесов и др., 2008):

$$\text{ind}U = \arccos(r_{ФД}).$$

По значению индекса из массива U_i рассчитывается значение напряжения методом линейной интерполяции. Всего массив содержит 181 значение для каждого фотодиода при изменении углов от -90 до $+90^\circ$.

В качестве уравнения для расчёта направления на Солнце используется разность между измеренным и вычисленным значением напряжения:

$$U_{\text{изм}_j} - U_{\text{выч}_j} = 0.$$

Полученная система для всей совокупности фотодиодов решается методом последовательных приближений по способу наименьших квадратов. Решением системы становятся углы направления на Солнце. Система составляется при условии попадания Солнца в поле зрения как минимум трёх оптических элементов. В случае работы двух датчиков вектор направления на Солнце вычисляется по средневзвешенному значению напряжения и углов осей чувствительности задействованных оптических элементов.

В результате расчёта в интерфейс внешних связей прибора выдаются углы направления на Солнце, единичный радиус-вектор во внутренней системе координат, время привязки измерения и несколько слов, характеризующих состояние прибора.

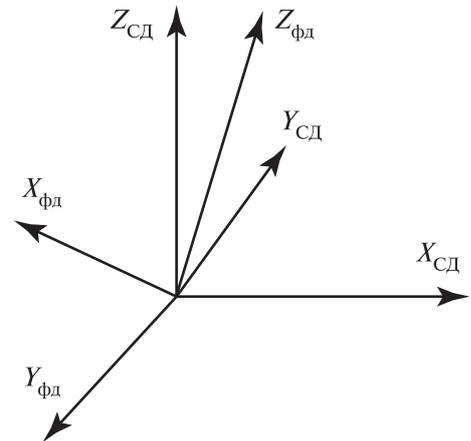


Рис. 6. Система координат оптического элемента и система координат прибора

Основные формулы математической модели

Основные формулы математической модели солнечного датчика приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Основные формулы математической модели напряжений фотодиодов

Параметры прибора	Массив напряжений одиночных оптических элементов	Моделирование напряжений совокупности фотодиодов
<ul style="list-style-type: none"> • Конфигурация оптических элементов dA, dz. • Параметры бленды. • Направляющие косинусы осей фотодиодов $I_{ФД}, m_{ФД}, \xi_{ФД}$. • Матрица установки фотодиодов $M_{\Phi}^{ФД}$. • Чувствительность фотодиодов S. • Коэффициент подавления защитного стекла. • Коэффициент пропускания молочного стекла $\tau_{МС}$. • Диаметр диафрагмы $d_{МС}$. • Расстояние от молочного стекла до фотодиода. • Разрядность и опорное напряжение АЦП $U_{оп}$. • Измерительное сопротивление $R_{изм}$. • Рабочая температура T. • Число шагов цифрового накопления $St_{цн}$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Задание углов Az в плоскости XU СК ФД от 0 до 360° с шагом 2°. • Задание углов θ в азимутальной плоскости СК ФД от 0 до 90°. • Определение освещённости элементарной площадки с учётом бленды $dE_{МС}$. • Поток излучения на молочном стекле: $F_{МС} = \sum_{\alpha=0}^{360} \sum_{r=0}^{d_{МС}/2} dE_{МС} dS_r$. • Освещённость молочного стекла: $E_{МС} = 4F_{МС} / \pi d_{МС}^2$. • Освещённость светорассеяния: $E_p = \tau_{МС} E_{МС}$. • Световой поток. • Средняя освещённость: $\bar{E}_{ФД} = \Phi_{ФД} / l_{ФД}^2$. • Напряжение: $U = S \bar{E}_{ФД}$. • Массив напряжений $U[8][91][180]$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Задание углов вектора направления на Солнце: $\alpha_S = 0-360^\circ, \beta_S = 0-360^\circ$. • Направление вектора на Солнце в СК ФСД: $r_S = \begin{pmatrix} \cos \alpha_S \cdot \sin \beta_S \\ \sin \alpha_S \cdot \sin \beta_S \\ \cos \beta_S \end{pmatrix}$. • Расчёт вектора направления на Солнце в СК ФД: $r_S^{ФД} = M_{ФСД}^{ФД} r_S$. • Азимут оси фотодиода в СК ФД: $Az_{ФД} = \arctan(m_{ФД} / l_{ФД})$. • Угол $\theta_{ФД}$ между осью Z и направлением на Солнце: $\theta_{ФД} = \arccos(r_Z r_{ФД})$. • Напряжение фотодиода: $U_{ФД} = U[i_{ФД}][\theta][Az/2]$. • Смоделированное напряжение: $U_{изм} = St_{цн} U_{ФД} + \sum_{i=1}^{St_{цн}} \sigma_U$

Таблица 2. Основные формулы математической модели солнечного прибора

Моделирование шумов	Расчёт направления на Солнце	Оценка точности определения направления на Солнце
<p>Тепловой шум:</p> $de = \sqrt{4kTR_{\Phi}} df,$ $de_{АЦП} = (2^{12} de) / U_{оп}.$ <p>Фотонный шум:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Расчёт энергии фотона $Q_{фт}$: $Q_{фт} = hc/\lambda$. • Световой поток $F_{ФД}$: $F_{ФД}^{лм} = \frac{U[0][90]}{S} l^2$. • Энергия светового потока и количество фотонов: $Q_{ФД} = F_{ФД}^{вт} t_{фт}, n_{фт} = Q_{ФД} / Q_{фт}$. • Вычисление фотонного шума $\sigma_{фт}$ и отношения сигнал/шум SN: $\sigma_{фт} = \sqrt{n_{фт}}, SN = n_{фт} / \sigma_{фт}$. • Определение фотонного шума: $\sigma_{фт}^U = U_{\theta=90} / SN, \dots, \sigma_{фт}^{АЦП} = (2^{12} \sigma_{фт}^U) / U_{оп}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Задание порогового уровня U_r. • Расчёт априорных углов α_x и α_y вектора направления на Солнце в СК ФСД: $\alpha_x = k_{\alpha}(U_1 - U_3), \alpha_y = k_{\alpha}(U_2 - U_4)$. • Расчёт вектора направления на Солнце в ФСД: $\ r_S\ = \sqrt{\tan^2 \alpha_x + \tan^2 \alpha_y + 1}$, $r_S = \begin{pmatrix} \tan \alpha_x \\ \ r_S\ \\ \tan \alpha_y \\ \ r_S\ \\ 1 \\ \ r_S\ \end{pmatrix}$. • Расчёт вектора направления на Солнце в СК ФД: $r_S^{ФД} = M_{ФСД}^{ФД} r_S$. • Расчёт углов $Az_{ФД}$ и $\theta_{ФД}$. • Определение напряжения: $U_{выч} = F_U(\theta_{ФД}, Az_{ФД})$. • Определение разности напряжений: $dU_i = U_{изм_i} - U_{выч_i}$. • По способу наименьших квадратов при условии $\sum dU^2 = 0$ уточнение априорных значений углов α_x и α_y вектора направления на Солнце 	<ul style="list-style-type: none"> • Задание углов вектора направления на Солнце: $\alpha_S = 0-360^\circ, \beta_S = 0-30^\circ$. • Напряжение на фотодиодах: $U_{изм} = F_U(\theta_{ФД}, Az_{ФД})$. • Расчёт направления на Солнце r_S в СК ФСД. • Разности углов: $d\alpha_x = \alpha_x^{зад} - \alpha_x^{выч}, d\alpha_y = \alpha_y^{зад} - \alpha_y^{выч}$. • Среднеквадратическое отклонение разности: $\sigma_{\alpha_x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n d\alpha_x^2}{n-1}}, \sigma_{\alpha_y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n d\alpha_y^2}{n-1}}$

В табл. 1 представлен перечень исходных данных и формулы, определяющие условия формирования напряжения на фотодиодах оптической головки. В первую колонку включены данные, которые описывают физические, конструкционные и ключевые электрические характеристики каждого оптического элемента, их взаимное расположение, а также температура, при которой функционирует прибор, и число шагов цифрового накопления. Во второй колонке приведены формулы для расчёта выходного напряжения на одиночных фотодиодах. Формулы в третьей колонке завершают формирование электрических сигналов для последующей обработки.

Таблица 2 содержит формулы математической модели, с помощью которых выполняется расчёт направления на Солнце и оценка точности полученного результата измерений. В первой колонке описан процесс моделирования шумов прибора. Во второй колонке приведены формулы расчёта направления на Солнце. Третья колонка описывает методику оценки точности выполненных измерений.

Работа с математической моделью

Управление и ввод данных, характеризующих параметры прибора, осуществляется через диалоговое окно программы, показанное на рис. 7. Результаты работы программы отображаются графически там же. Кроме того, по результатам математического моделирования программа формирует текстовый файл, содержащий ключевые характеристики прибора при заданных оператором параметрах.

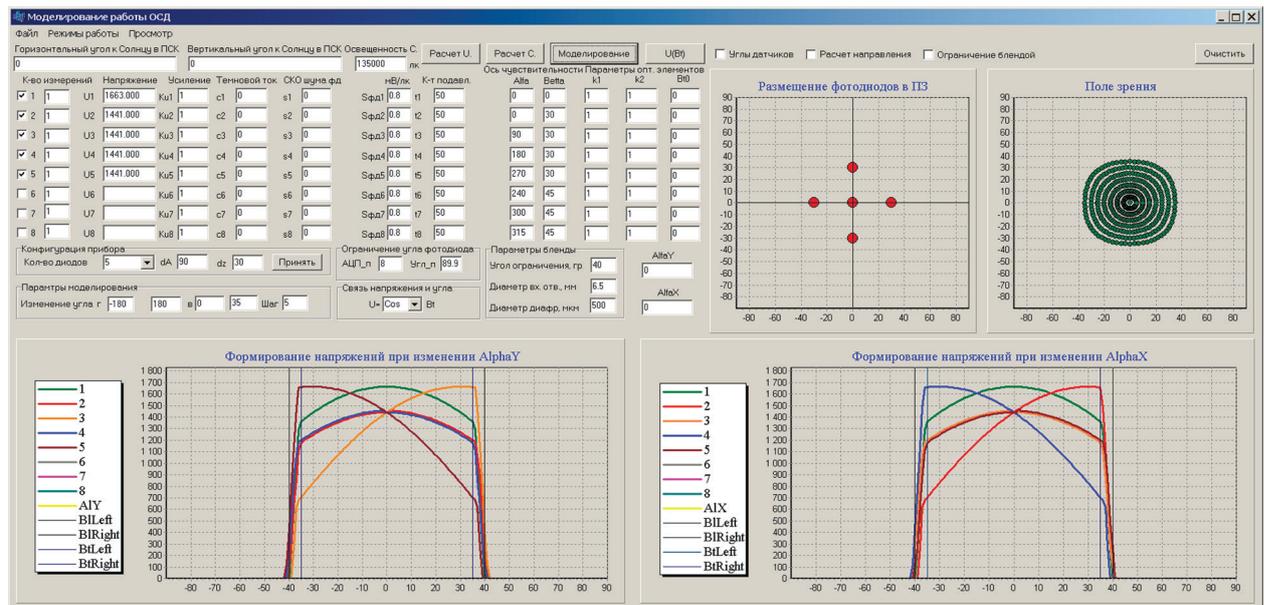


Рис. 7. Окно программы с результатами моделирования солнечного датчика с пятью фотодиодами

Результаты моделирования нескольких вариантов солнечных датчиков с различным числом фотодиодов приведены в табл. 3.

Представленный на рис. 8 (см. с. 96) график показывает «облагораживающее» воздействие цифрового накопления при его использовании для обработки первичных сигналов.

Полученные при моделировании результаты позволяют сделать вывод о том, что сочетание достаточно простых оптических элементов, фотодиодов и современного процессора позволяет построить малогабаритный солнечный датчик ориентации с достаточно высокой для такого типа приборов помехозащищённостью и точностью измерений.

Таблица 3. Результаты моделирования различных вариантов солнечных датчиков при заданных параметрах

Число ФД	Угол наклона ФД, град	Диаметр бленды, мм	Угол бленды, град	Диаметр диафрагмы, мкм	СКО U, градаций АЦП	Число шагов ЦН	Поле зрения, град	Ошибка измерения СКО, угл. мин
5	30	6,5	40	500	0	1	70×70	1,5
					0	16		1,2
					5	1		19,6
					5	16		10,0
4	30	6,5	40	500	0	1	70×70	1,1
					0	16		0,2
					5	1		19,8
					5	16		5,6
7	45	6,5	40	500	0	1	70×70	1,8
					0	16		0,8
					5	1		15,6
					5	16		11,6
6	45	6,5	40	500	0	1	70×70	1,8
					0	16		0,3
					5	1		12,0
					5	16		3,2

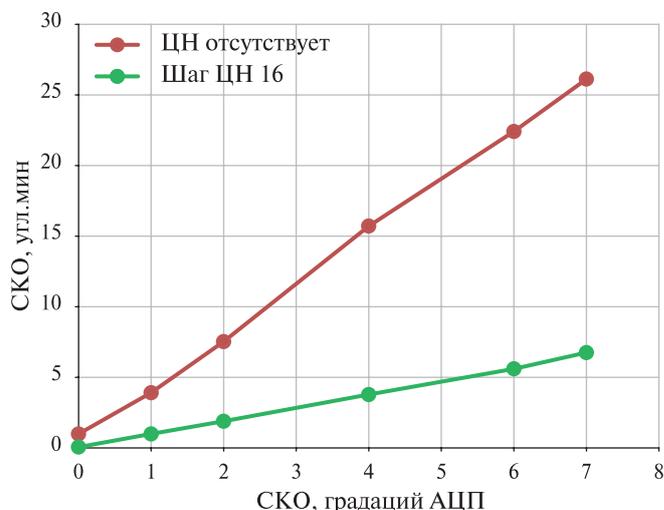


Рис. 8. Ошибка определения углов направления на Солнце в зависимости от уровня шума при отсутствии цифрового накопления и при 16 шагах цифрового накопления

Литература

1. Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Тарнопольский В.И. и др. Телевизионная съемка кометы Галлея / отв. ред. Р.З. Сагдеев. М.: Наука, 1989. 295 с.
2. Аванесов Г.А., Никитин А.В., Форш А.А. Оптический солнечный датчик // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 70–73.
3. Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Зарецкая Е.В., Куделин М.И., Никитин А.В., Форш А.А. Оптический солнечный датчик. Особенности конструкции и испытательного оборудования // Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 78–89.

Mathematical model of solar orientation sensor based on photodiodes

G. A. Avanesov, B. S. Zhukov, A. V. Nikitin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru

Solar orientation sensors based on photodiodes have been widely used in space technology since the mid-seventies of the past century, and have many design implementations. The article describes a mathematical model of a solar sensor based on single photodiodes located on the faces and upper base of three, four and six-sided regular truncated pyramids. The model assumes that the data from each photodiode is digitized and processed by a modern microprocessor device. The model calculates the key parameters of the device based on the given arrangement of photodiodes and their characteristics, as well as taking into account the optical elements that form the sensitivity diagram and the field of view of each of them. These elements include: protective glass in front of each photodiode, its microblend, aperture diaphragm and diffuser glass. Based on these data, the illumination produced by the Sun on the photodiodes is calculated at different viewing angles. The program embedded in the model determines the field of view of the device, calculates the angles of direction to the Sun, evaluates the measurement accuracy and displays the results. The following quantities are calculated in the program: the angles between the direction to the Sun and the sensitivity axes of the photodiodes, the dependence function of the voltage on the photodiodes on the angle between their sensitivity axes and the direction to the Sun. The resulting voltage values, taking into account noise, are used to calculate the direction cosines of the solar vector in the internal coordinate system of the device. The difference between the measured and calculated voltage value is used as an equation for calculating the direction to the Sun. The system of equations obtained for the entire set of photodiodes is solved by the method of successive approximations using the least squares method. The solution of the system is the direction angles to the Sun. The calculation results are compared with the values specified in the program, which makes it possible to determine the magnitude of the measurement error. If there are text files with a record of real measurements, the program can process them and evaluate the results.

Keywords: Sun orientation, photodiode, analog signal, coordinate system, lens hood, aperture diaphragm, signal/noise, digital accumulation

Accepted: 10.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-89-97

References

1. Avanesov G. A., Ziman Ya. L., Tarnopol'skii V. I. et al., *Televizionnaya s'emka komety Galleya* (TV footage of Halley's Comet), R. Z. Sagdeev (ed.), Moscow: Nauka, 1989, 295 p. (in Russian).
2. Avanesov G. A., Nikitin A. V., Forsh A. A., Optical solar sensor, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2003, Vol. 46, No. 4, pp. 70–73 (in Russian).
3. Avanesov G. A., Ziman Ya. L., Zaretskaya E. V., Kudelin M. I., Nikitin A. V., Forsh A. A., Optical solar sensor. Features of design and test equipment, *Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Proc., Tarusa, 22–25 Sept., 2008, Moscow: IKI RAS, 2009, pp. 78–89 (in Russian).