

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЗВЁЗДНЫХ ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ ДО СУБСЕКУНДНОГО УРОВНЯ

TO A QUESTION OF INCREASING TO SUB-SECOND STELLAR SENSORS ORIENTATION ACCURACY

А.И. Захаров¹,
zakh@sai.msu.ru;
A.I. Zacharov

Н.Л. Крусанова¹,
nat.krouss@gmail.com;
N.L. Krusanova

И.В. Москатиньев²,
miv@laspace.ru;
I.V. Moskatiniyev

М.Е. Прохоров¹,
доктор физико-
математических наук,
доцент, mike@sai.msu.ru;
M.E. Prohorov

О.Ю. Стеколыщников¹,
кандидат технических
наук, ocl@inbox.ru;
O.Y. Stekol'shchikov

В.К. Сысоев²,
доктор технических наук,
sysoev@laspace.ru;
V.K. Sysoev

М.С. Тучин¹,
maksim.tuchin@gmail.com;
M.S. Tuchin

А.Д. Юдин²,
yudin@laspace.ru;
A.D. Yudin

Современные датчики звёздной ориентации строятся на основе матричных фотоприёмников – ПЗС или КМОП матриц. Серийно выпускаемые приборы, как зарубежные, так и отечественные, имеют точность порядка 1–3 угловых секунд. Однако развитие космической отрасли требует перехода к величинам с большими точностями ориентации – такие требования выдвигает космическая лазерная связь, контроль околоземного пространства и космического мусора, а также высокоточная глобальная картография и дистанционное зондирование Земли. Проблемы, возникающие при попытке сделать современные звёздные датчики более точными, обсуждаются в приведённой статье.

Ключевые слова:
звёздный датчик;
ориентация космического аппарата.

ВВЕДЕНИЕ

Современные звёздные датчики (ЗД) – приборы, которые наблюдают (фотографируют) звёздное небо и по полученному кадру определяют свою ориентацию, что позволяет определить ориентацию космического аппарата (КА) или летательного аппарата, на борту которых установлен ЗД.

С начала космической эры основными бортовыми системами определения ориентации КА были инерциальные системы, основанные на гироскопах. Звёздные датчики тоже использовались, но играли вспомогательную роль, поскольку инерциальные

Current stellar sensors base on matrix photodetector such as CCD or CMOS. Serial produced devices, both foreign and domestic, have accuracy about 1–3 angular seconds. However, space industry development requires transition to magnitude with more orientation accuracy, for example, space laser link, near-earth space and debris control, high precision global cartography and remote sensing of the Earth put forward such requirements. In this paper occurred problems trying to do current stellar sensors more accurate are discussed.

Keywords:
stellar sensor;
spacecraft orientation.

системы были точнее, а ресурс гироскопов позволял таким системам непрерывно функционировать в течение всего срока активного существования КА.

Однако ситуация меняется, и за последние двадцать лет звёздные датчики стали точными и могут многие годы работать непрерывно, тем не менее до сих пор на борту большинства тяжёлых КА устанавливаются инерциальные системы ориентации. За эти же два десятилетия погрешность серийно выпускаемых ЗД уменьшилась примерно от 10–15" до 1–3".

¹ Государственный Астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ, Россия, г. Москва.

Sternberg Astronomical Institute Moscow University, Russia, Moscow.

² АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Lavochkin Association, Russia, Moscow region, Khimki.

Потребности в точной ориентации растут; глобальная метеорология, дистанционное зондирование Земли высокого разрешения, космическая лазерная связь уже сегодня требуют определения ориентации КА с погрешностями порядка $0,1''$ (Барабанов А.А. и др., 2016; Гордиенко Е.С. и др., 2016)

Один такой датчик уже существует, это разработанный около десяти лет назад фирмой Bell Aerospace ЗД HAST (High Accuracy Star Tracker), имеющий полную погрешность $0,2''$ (Michaels D.L., Speed J.F., 2004). Это крупный, тяжёлый и сложный прибор, включающий в себя две оптические головки и блок обработки данных. С момента создания было изготовлено всего около десятка экземпляров HAST.

В России ведётся опытно-конструкторская работа (ОКР) «Астродатчик», целью которой является разработка и создание технологии изготовления перспективных приборов звёздной ориентации (не менее трёх классов точности) для отечественных КА. Самый точный ЗД, который разрабатывается в этом проекте, должен иметь случайную погрешность $0,3''$. Этот ЗД, вероятно, будет построен на основе новой оптической головки с КМОП-матрицей, разработанной в ИКИ РАН, на основе которой создан, в частности, ЗД мини блоков определения координат звёзд (БОКЗ) (Аванесов Г.А. и др., 2016).

При разработке высокоточных ЗД возникает ряд типичных проблем. Ниже мы рассмотрим, в чем они состоят и как их преодолеть.

1. Принципы функционирования ЗД

Самые первые звёздные датчики определяли ориентацию КА по паре конкретных ярких звёзд. Для наведения на каждую из звёзд использовались узкопольные оптические датчики с фиксированным углом между ними. Сначала на первичную звезду наводился первый из двух датчиков, затем звезда удерживалась в центре его поля зрения, а КА вращался вокруг оптической оси первого датчика, пока в поле зрения второго не попадала вторичная звезда ориентационной пары (Федосеев В.И., Колосов М.П., 2007). После этого система ориентации КА удерживала каждую из звёзд в центре поля соответствующего датчика, а КА сохранял свою ориентацию относительно инерциальной системы координат.

Часто в качестве первичной звезды выбирали Солнце, поскольку из-за его яркости на него было проще всего наводиться, а в качестве вторичных звёзд брались ярчайшие звезды неба: Сириус, Канопус, Бетельгейзе и др. Для спутников с почти экваториальной орбитой удобной первичной звездой являлась Полярная, которая на таких орбитах никогда не перекрывалась Землёй.

Революция в конструкции звёздных датчиков произошла с появлением достаточно дешёвых и чувствительных матричных приёмников излучения с большим числом пикселей. Сегодня ЗД представляет собой обычную (но с высокой чувствительностью) фотокамеру, оснащённую специальным программным обеспечением, в частности, в памяти ЗД хранится каталог звёзд с их координатами на небесной сфере. Такие датчики работают следующим образом: выполняется экспозиция, в результате которой на приёмнике излучения получается изображение участка неба, попадающего в поле зрения датчика. В кадре находятся и выделяются изображения звёзд, для каждой найденной звезды определяются координаты центров их изображений — фотоцентров — в системе координат, связанной с матричным фотоприёмником. Затем производится отождествление «звёздного узора» в кадре со звёздами из бортового каталога. И, наконец, по изображениям отождествлённых звёзд, для которых известны координаты, как на матричном фотоприёмнике, так и на небесной сфере, определяется трёхмерный поворот, который переводит один набор координат в другой. На основе параметров этого поворота вычисляют ориентацию конструктивных осей ЗД относительно инерциальной системы координат в одном из стандартных видов, чаще всего — в виде кватерниона ориентации. Указанный цикл непрерывно повторяется с частотой несколько раз в секунду.

2. Погрешность определения фотоцентра одной звезды

Звёзды, которые мы видим на небе, самые лучшие из известных в природе приближений к абстрактному понятию точечного источника излучения. Несмотря на то, что линейные размеры звёзд сравнимы с размерами Солнца, а у некоторых звёзд они в сотни раз больше, расстояния до звёзд столь велики, что современная астрономия смогла изменить размеры только нескольких сот ближайших звёзд, и для этого пришлось использовать самые большие телескопы.

Изображения звёзд на фокальной плоскости ЗД имеют конечный размер, который определяется дифракцией на входной апертуре объектива. Так, дифракция на круглой входной апертуре, которой обладают, например, линзовые объективы, создаёт изображение с радиусом

$$r = 1.22 \frac{\lambda}{d} F, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения; d — диаметр апертуры; F — фокусное расстояние объектива. Эта формула применима и для входных апертур другой формы, меняется только коэффициент.

Распределение интенсивности излучения в изображении звезды быстро убывает от центра к краям. Это убывание может быть монотонным или иметь колебательный характер; в последнем случае изображение имеет вид яркого центрального кружка, окружённого рядом все более слабых колец. Характерный размер области изображения, в которую попадает основная часть излучения, описывается формулой (1) с другим коэффициентом, зависящим от конкретного распределения интенсивности в изображении:

$$R = C \frac{\lambda}{d} F. \quad (2)$$

Теперь рассмотрим вопрос определения погрешности фотоцентра изображения звезды. Он создаётся фотонами, попадающими на фотоприёмник и создающими в нем фотоэлектроны. Если бы приёмник излучения регистрировал место рождения каждого фотоэлектрона, то координаты фотоцентра изображения звезды, содержащего N фотоэлектронов, задавались бы формулами

$$x_* = \frac{1}{N} \sum_i x_i, \quad y_* = \frac{1}{N} \sum_i y_i, \quad (3)$$

где x_i и y_i – координаты рождения i -го фотоэлектрона. Распределение электронов в каждом изображении звезды случайно, плотность вероятности этого распределения пропорциональна распределению интенсивности света в изображении. Дисперсия D этого распределения будет равна квадрату характерного размера изображения (2), а среднеквадратичная ошибка среднего, т.е. погрешность координат фотоцентра, будут равны

$$\Delta x_* = \Delta y_* = \frac{R}{\sqrt{N}}. \quad (4)$$

Эта погрешность связана с дискретной квантовой природой света и является чисто случайной. Увеличивая число накопленных фотоэлектронов от звезды, эту ошибку можно уменьшить, но полностью устранить её нельзя.

Формулы (3) и (4) описывают идеальную ситуацию, когда фотоприёмник регистрирует только фотоны от звезды. В реальной ситуации помимо этого полезного сигнала приёмник будет регистрировать шумы различной природы: физический фон излучения, например, фон неба, темновой (тепловой) фон термоэлектронов, шумы считывания и пр. В этом случае погрешности (4) будут описываться более общими формулами:

$$\Delta x_* = \Delta y_* = \frac{R}{SNR} = \frac{R}{\sqrt{N_* + D_{bg} + \sigma_{nd}^2}}, \quad (5)$$

здесь SNR – отношение сигнала к шуму от звезды; N_* – число квантов, зарегистрированных от звезды; D_{bg} – дисперсия суммарного шума от фона; σ_{nd} – среднеквадратичная ошибка шума чтения.

Интенсивность изображения звезды быстро убывает по мере удаления от её центра, в то время как уровень фоновых шумов остаётся примерно постоянным. Если брать электроны, зарегистрированные внутри круга с центром в центре изображения звезды, то по мере увеличения его радиуса SNR будет расти, на радиусе, где интенсивность изображения от звезды сравнивается с шумом от фона, SNR достигает максимума, а при дальнейшем увеличении радиуса круга SNR убывает. Это означает, что брать слишком большую область для выделения сигнала от звезды не следует.

3. Изображение звезды на матричном фотоприёмнике

Координатно-чувствительные фотоприёмники, которые могут определять координаты рождения в фокальной плоскости отдельных фотоэлектронов, в современных 3Д не используются, вместо них применяют гораздо более простые и дешёвые ПЗС или КМОП-матрицы. В этих фотоприёмниках места попадания фотонов на фотоприёмник не различаются в пределах пикселя. Можно считать, что все фотоэлектроны, зарегистрированные в пикселе, рождаются точно в его центре. В этом случае координаты фотоцентра звезды будут вычисляться по другим формулам:

$$x_* = \frac{\sum_i \sum_j n_{ij} x_i^{(c)}}{\sum_i \sum_j n_{ij}}, \quad y_* = \frac{\sum_i \sum_j n_{ij} y_i^{(c)}}{\sum_i \sum_j n_{ij}}, \quad (6)$$

здесь n_{ij} – число квантов, зарегистрированных в пикселе, лежащем на пересечении i -й строки и j -го столбца матрицы; $x_i^{(c)}$, $y_i^{(c)}$ – координаты центра соответствующего пикселя. При таком представлении полное число квантов в изображении звезды $N = \sum_i \sum_j n_{ij}$. При этом формулы (4) и (5) можно применить для оценки случайной погрешности фотоцентра.

В отличие от позиционно-чувствительных приёмников, в ситуации с матричными фотоприёмниками присутствуют два линейных масштаба: характерный размер дифракционного изображения звезды R (см. формулу (2)) и линейный размер пикселя p . Их соотношение играет важную роль.

Если сделать размер изображения существенно меньше размера пикселя $R \ll p$ (такое изображение называют субпиксельным), то все кванты попадут в один пиксель и, что хорошо видно из (6), координаты фотоцентра звезды будут совпадать с координатами центра этого пикселя. Ни изменение числа зарегистрированных электронов, ни перемещение субпиксельного изображения звезды внутри пикселя не приводят к изменению положения фотоцентра изображения звезды.

Таким образом, в субпиксельном режиме положение звезды на матричном фотоприёмнике определяется только с точностью до пикселя. Следовательно, субпиксельные изображения непригодны для определения ориентации. С другой стороны, при увеличении размера изображения звезды хотя бы до 2×2 пикселей можно, согласно формуле (5), достичь сколь угодно малой погрешности положения фотоцентра – много меньшей размера пикселя – для этого необходимо получить изображение звезды с очень высоким SNR . Отметим, что в реальных матрицах величина SNR ограничивается максимальным зарядом пикселя.

При наличии шумов область матричного фотоприёмника, которую занимает изображение звезды не может быть слишком большой потому, что добавление каждого дополнительного пикселя увеличивает как регистрируемые фоновые шумы, так и шумы чтения. Оптимальной для измерения координат звезды является ситуация, когда часть изображения звезды, содержащая основную долю фотонов (например, 80%), занимает область 2×2 или 3×3 пикселя. Это соответствует отношению R/p , слегка большему единицы. Подробнее этот вопрос рассмотрен в (Федосеев В.И., Колосов М.П., 2007).

Заметим, что значения x_* и y_* , полученные по формулам (2) и (5), будут различаться, это связано с систематическими ошибками, возникающими при дискретизации (пикселизации) изображения. Первая из них связана матричной природой фотоприёмников ЗД, т.е. с заменой координат прихода фотонов на координаты пикселей, в которые они попадают. Другая систематическая ошибка вызывается ограниченностью области, которую занимает изображения звезды. Подробнее эти ошибки рассмотрены в работе (Захаров А.И., Никифоров М.Г., 2011).

При увеличении числа пикселей, которые занимает изображение звезды, обе указанные систематические ошибки убывают, но увеличение числа пикселей, занимаемых изображением, снижает SNR .

4. Как повысить точность ЗД?

Рассмотрим хороший современный серийный ЗД, имеющий случайную погрешность, равную $1-3''$. Такие датчики выпускают как в России, так и за рубежом, по конструкции все они похожи (Дятлов С.А., Бессонов Р.В., 2011). Все они используют матрицы размером 1024×1024 или 2048×2048 пикселей, линзовые объективы с фокусным расстоянием от 20 до 50 мм; ширина поля зрения у этих ЗД от 10° до 20° , а предельная звёздная величина навигационных звёзд $5-6^m$. Более подробно эти данные представлены в таблице.

Что нужно сделать с этими типичными ЗД, чтобы повысить их точность до $0,1''$?

При этом будем полагать, что в высокоточном датчике будут использоваться те же матрицы, что и в «серийных», поскольку используемые в них ПЗС и КМОП-матрицы вполне хороши.

Первое, что нужно сделать, – это примерно в 10 раз увеличить фокусное расстояние объектива и одновременно во столько же раз уменьшить размер изображения R звезды на фокальной плоскости, чтобы отношение R/p осталось неизменным, т.е. чтобы изображение звезды занимало то же число пикселей на матрице.

Этого достаточно для требуемого повышения точности до $0,1''$, если мы сохраним неизменными следующие параметры ЗД: число звёзд в поле зрения и SNR для типичной звезды. При сохранении используемой матрицы последнее требование эквивалентно сохранению числа квантов, полученных от типичной звезды.

При увеличении фокусного расстояния в 10 раз до 300–500 мм ширина поля зрения уменьшится в то же число раз до $1-2^\circ$, а телесный угол проекции кадра на небо составит несколько квадратных градусов. В такой небольшой области скорее всего не будет ни одной звезды 5^m или 6^m . Необходимое число звёзд восстановится на уровне $9-10^m$.

таблица – Характеристики типичных серийных ЗД

производитель	ИКИ РАН БОКЗ-М	МОКБ «МАРС» АД-1	Sodern (Франция) SED26
диаметр входного зрачка	24 мм	25,6 мм	20 мм
фокусное расстояние	60 мм	52 мм	28,8 мм
поле зрения	8°	18°	25°
формат матрицы ПЗС, размеры пикселя	512×512 пкс., (16×16 мкм), $55 \times 55''$	512×512 пкс., (23×23 мкм), $91 \times 91''$	1024×1024 пкс., (13×13 мкм), $93 \times 93''$
площадь поля зрения	60 кв. град	163 кв. град	483 кв. град
звёздный каталог	8500 звёзд до $7,5^m$	3500 звёзд до 6^m	2000 звёзд до $4,5^m$
погрешности $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	$3/15''$ ($\omega < 0,36''/с$)	$15/60''$	$5/25''$ ($\omega < 0,5''/с$)
частота обновления	0,3 Гц	0,5 Гц	от 1 до 7,8 Гц

Поток излучения от этих звёзд в 40 раз слабее, чем от звёзд в «серийных» ЗД. Для того чтобы зарегистрировать от них то же число квантов, необходимо в 6–7 раз увеличить диаметр объектива (примерно до 100 мм).

Следует заметить, что бортовой каталог высоко-точного ЗД будет содержать несколько сот тысяч звёзд, в то время как «серийные» датчики обходятся каталогами с 3000–6000 звёзд.

Если мы откажемся от жёсткой фиксации параметров матричных приёмников излучения, то полученные характеристики ЗД, требуемые для достижения необходимой точности, будут лежать в более широких пределах.

Подробнее процедура расчёта характеристик ЗД, необходимых для достижения заданной точности, описана в (Захаров А.И. и др., 2013; Прохоров М.Е. и др., 2013).

5. Систематические ошибки

В отличие от случайных ошибок, систематические погрешности от измерения к измерению остаются неизменными или закономерно меняются в зависимости от значений некоторых неслучайных параметров. Если мы знаем эту зависимость и значения параметров, то можем вычислить поправку к результату измерения для устранения систематической погрешности. Если же природа систематической ошибки неизвестна, то устранить её не удастся, она добавится к случайным погрешностям и может значительно увеличить суммарную погрешность.

Рассмотрим некоторые типы систематических ошибок, существенно влияющих на точность ЗД.

Неоднородность темновых токов. Даже если на фотоприёмник не падает свет, тепловые движения атомов приводят к появлению свободных электронов (термоэлектронов), которые будут накапливаться в пикселях. Термогенерация электронов создаёт так называемый «темновой фон». Темновые токи в соседних пикселях сильно варьируются, типичными являются отклонения на 60–80% от среднего уровня. Помимо таких нормальных вариаций, в матрицах встречаются отдельные «горячие пиксели», темновые токи которых в десятки и даже в сотни раз превышают среднее значение.

Величина темнового тока сильно зависит от температуры фотоприёмника, она снижается примерно в два раза при его охлаждении на каждые 5°C.

Таким образом, от влияния темновых токов можно избавиться, если достаточно сильно охладить матрицу, но этот подход может оказаться неприемлемым из-за больших затрат энергии на охлаждение.

В большинстве ЗД из полученного кадра вычитается общий для всех пикселей средний уровень темновых токов. В этом случае неучтённый систематический разброс токов в пикселях складывается со случайной ошибкой сигнала.

Другой способ учёта неоднородности темновых токов: необходимо измерить и запомнить уровни токов в каждом пикселе, а затем вычесть средний уровень темнового тока из каждого пикселя (Тучин М.С. и др., 2013).

Следует иметь в виду, что под действием космической радиации темновые токи ПЗС и КМОП-матриц систематически возрастают, а их значения в каждом отдельном пикселе меняются. После получения некоторой дозы облучения карта темновых токов матрицы может стать совершенно не похожей на начальную.

Наличие «горячих пикселей» следует учитывать даже при охлаждении приёмника излучения.

Неоднородность чувствительности фотоприёмника. Неоднородность чувствительности матричного фотоприёмника в ЗД можно разделить на три составляющие:

- систематическое изменение яркости изображения от центра к краю кадра, вызываемое экранированием и виньетированием изображения оптической системой ЗД;
- изменение средней чувствительности пикселей матрицы от пикселя к пикселю;
- различие чувствительности внутри пикселя.

Сумму первых двух зависимостей чувствительностей можно получить, сделав кадр равномерно освещённого фона, построив так называемое «плоское поле». Для учёта неоднородности средней чувствительности пикселей в кадре исходное изображение после вычета из него темновых токов необходимо попиксельно поделить на нормированное «плоское поле».

Разброс внутрипиксельной чувствительности определяется структурой пикселя фотоприёмника. У ПЗС и КМОП-матриц с прямой засветкой снижение чувствительности вызывается поглощением света в полупрозрачных электродах, расположенных поверх светочувствительной поверхности матриц. Помимо этого, в пикселях КМОП-матриц присутствуют нечувствительные к свету транзисторы, поэтому даже КМОП-матрицы с обратной засветкой обладают внутрипиксельной неоднородностью чувствительности. Почти идеальной однородностью чувствительности в пикселе обладают ПЗС-матрицы с обратной засветкой: в них нет транзисторов, а электроды располагаются на обратной стороне утончённой матрицы.

При наложении изображения звезды на группу пикселей с такой сложной структурой внутрипиксельной чувствительности возникает систематическая ошибка, зависящая от положения центра изображения звезды внутри пикселя. Необходимую поправку можно рассчитать численно.

Аберрации оптической системы. Аберрации оптической системы – это ошибки или погрешности изображения в оптической системе, вызывающие отклонение лучей от направлений, по которым они должны были следовать в идеальной оптической системе. В оптике принято выделять классические аберрации оптической системы, которые не зависят от длины волны излучения. К ним относятся сферическая аберрация, кома, астигматизм, дисторсия и кривизна поля. На самом деле все эти монохроматические аберрации описываются полиномом третьего порядка по фокальной плоскости. Полином общего вида заодно учитывает наклон оптической оси к приёмнику излучения и несовпадение центра кадра и оптической оси.

Определить коэффициенты аберрационного полинома можно путём наблюдения оптической миры или семейства искусственных звёзд с известными положениями. Коэффициенты полинома сохраняются в постоянной памяти ЗД.

Хроматические аберрации оптической системы. Величина хроматической аберрации оптической системы зависит как от положения звезды в поле зрения, так и от длины волны излучения. Хроматическими аберрациями обладают все типы оптических систем, в зеркальных системах её причиной является дифракция излучения, которая зависит от длины

волны, а в линзовых – кроме того дисперсия света в стекле. Хроматические аберрации в линзовых системах во много раз больше, чем в зеркальных, катодоптрические системы занимают промежуточное положение.

Температура звёзд меняется в широких пределах от 2000 К до 50 000 К, а их «цвет» соответственно от красного до бело-голубого. Из-за хроматической аберрации изображения звёзд, расположенных в одном и том же месте поля зрения ЗД, но разных цветов, будут смещены друг относительно друга на фокальной плоскости (*Завгородний Д.С. и др.*, 2016). Это смещение называется «хроматическим сдвигом» и зависит от конструкции объектива.

Наиболее частый способ устранения этой систематической ошибки – определить и сохранить в памяти ЗД зависимость хроматического сдвига от положения звезды в кадре, а для каждой навигационной звезды внести в бортовой каталог информации о её «цвете». По этим данным для каждого кадра и для каждой навигационной звезды в нём вычисляется поправка, компенсирующая хроматическую аберрацию.

Возможно частичное исправление хроматической аберрации физическими методами. Так, используя линзы из стёкол с различной дисперсией света, можно добиться, чтобы положения изображений в нескольких длинах волн совпадали. Обычно это достигается не на всей фокальной плоскости (*Завгородний Д.С. и др.*, 2016).

Хроматическая аберрация от зеркальных объективов обычно пренебрежимо мала для целей звёздной ориентации.

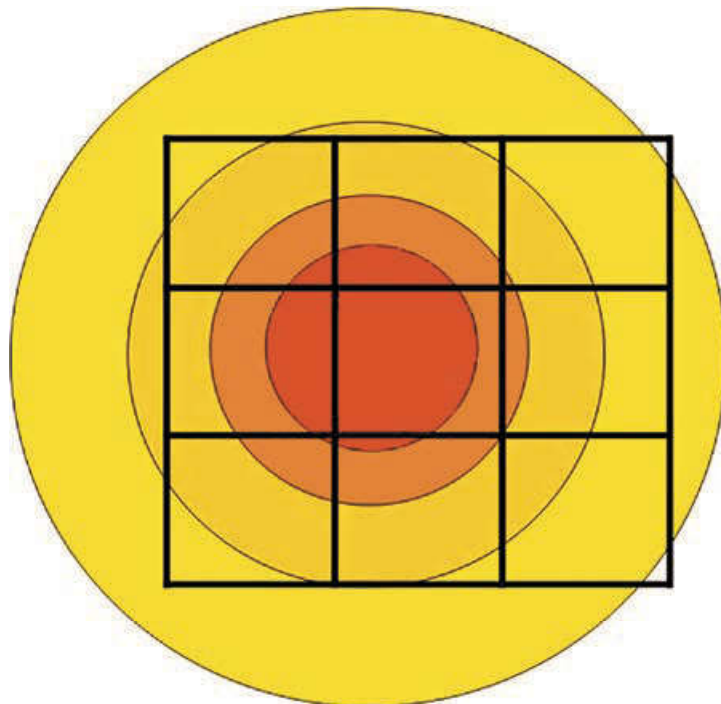


рисунок 1. Ограничение области, занимаемой изображением звезды

Ошибка пикселизации. В кадрах, получаемых на матричных фотоприёмниках, истинное непрерывное распределение интенсивности в изображении звезды заменяется ступенчатым, с постоянным значением внутри пикселя. Если исходное распределение симметрично, то при попадании центра изображения звезды в центр пикселя или в середину стороны пикселя, или в угол пикселя, то без учёта шумов и флуктуаций фотоцентр пикселизованного изображения будет совпадать с центром истинного. Во всех остальных случаях они будут смещены друг относительно друга. Эта ошибка зависит от распределения интенсивности в изображении звезды и от размера пикселя (*Захаров А.И., Никифоров М.Г.*, 2011). Она может быть вычислена для каждой звезды и учтена.

Ограниченность размера изображения звезды. Для достижения наилучшего SNR от звезды мы считываем сигнал от неё с ограниченного фрагмента изображения. Если центр звезды смещён относительно центра этого фрагмента, то крылья изображения поразному попадают внутрь него: в направлении смещения внутрь фрагмента попадёт меньшая часть крыла, чем в противоположном (рисунок 1). Следовательно, фотоцентр изображения звезды будет слабее смещён от центра, чем истинный его центр (*Захаров А.И., Никифоров М.Г.*, 2011). Эта погрешность также может быть вычислена и учтена для каждой звезды.

Ошибка координат звёзд в каталоге. Обычно координаты звёзд в бортовом каталоге ЗД имеют точность в несколько раз выше точности прибора. Этого достаточно для того, чтобы погрешность координат не сказывалась на результате работы ЗД. Например, для «серийного» ЗД с погрешностью $1''$ координаты звёзд необходимо знать с погрешностью $0,3''$, для высокоточного ЗД с погрешностью $0,1''$ погрешность координат звёзд не должна превосходить $0,03''$, лучше $-0,01''$. Для звёзд до 12^m координаты с такими точностями были получены в космическом эксперименте «Hipparcos» (*Ковалевский Ж.*, 2004), проведённом в 1989–1993 гг., и собраны в каталоге Tycho-2 (*Høg E. et al.*, 2000). Однако звёзды обладают собственным движением – перемещаются по небу. Большинство из них делают это медленно, но некоторые (таких немного) – быстро. В результате, истинные координаты звёзд отличаются от координат звёзд в каталоге, что приводит к появлению дополнительной ошибки.

Ярких звёзд, которые сместились от положений на момент создания каталога Tycho-2 более чем на $1''$, менее десятка, к ним относятся α Центавра, θ Эридана и др. Это означает, что «серийный» ЗД будет давать ошибки в нескольких областях неба. Звёзд ярче $10-12^m$, которые сместились более чем на $0,1''$, – несколько сотен. Их существование приводит к тому

же эффекту, только «сбойных» участков на небе будет больше.

Для устранения этой ошибки в ЗД надо записывать каталог звёзд с координатами, приведёнными к эпохе использования датчика, или исключать быстро движущиеся звёзды из каталога.

Конфигурационная ошибка. Эта ошибка также связана с каталогом, она возникает, когда навигационные звёзды в поле зрения образуют компактную группу. На точность определения координат центра кадра такая конфигурация не влияет, а погрешность третьего угла – разворота кадра вокруг оптической оси ЗД относительно заданного направления (например, относительно направления на Северный полюс мира) – может заметно увеличиться.

Устранить или уменьшить эту ошибку можно добавлением в бортовой каталог дополнительных навигационных звёзд в окрестностях компактной группы звёзд.

Аберрация света. Аберрация света приводит к смещению видимых положений удалённых объектов для движущегося наблюдателя в сторону его движения относительно направления на объект, регистрируемого неподвижным наблюдателем. Величина аберрации равна

$$\delta\theta = -\frac{V}{c} \sin\theta, \quad (7)$$

здесь V – скорость движения наблюдателя; c – скорость света; θ – угол между направлением вектора скорости $\vec{V}$ и направлением на объект. Знак минус означает, что аберрация уменьшает угол θ .

Для околоземного КА различают годичную и орбитальную аберрации. Первая связана с движением Земли по почти круговой орбите вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. Максимальная величина годичной аберрации составляет $40''$. Эту поправку ЗД может вычислять самостоятельно, нужно только знать дату и время момента измерения. Необходимые формулы приведены, например, в (*Подобед В.В., Нестеров В.В.*, 1982).

Орбитальная аберрация вызывается движением КА вокруг Земли, её величина меньше (скорость околоземного КА не превосходит 8 км/с на круговой орбите и $11,2$ км/с в перигее очень вытянутой эллиптической орбиты), но для определения направления движения надо знать параметры орбиты и перевычислять скорость не реже чем раз в несколько минут. Эти поправки может вычислять сам ЗД (по переданным ему параметрам орбиты или скорости) или же бортовая система КА.

Передача ориентации. Ещё один источник систематических ошибок – внешний по отношению к ЗД – это точность его установки на КА и поддержание её во время эксплуатации.



рисунок 2. Внешний вид прототипа высокочастотного звёздного датчика

6. Прототип высокочастотного звёздного датчика ориентации

В 2011–2012 гг. в ГАИШ МГУ был разработан прототип высокочастотного звёздного датчика ориентации (Стекольников О.Ю. и др., 2013). Дальнейшее изложение основано на опыте его разработки и последующих испытаний.

Мы хотели, чтобы этот датчик имеет случайную погрешность $0,1''$ и частоту опроса 10 Гц. Последнее означает, что максимальное время накопления сигнала не превышает 0,1 с. Мы не накладывали ограничений на число и размер пикселей ПЗС или КМОП-матриц, которые могли использоваться в этом ЗД. Для каждой из этих матриц было осуществлено «рассуждение», описанное выше в разделе «Как повысить точность ЗД». В результате был получен список сочетаний параметров ЗД, которые позволяли достичь указанных выше погрешности и частоты опроса. Среди этих параметров были: число и линейный размер пикселя фотоприёмника, фокусное расстояние и диаметр объектива, число и предельная звёздная величина навигационных звёзд в кадре (Захаров А.И. и др., 2013; Прохоров М.Е. и др., 2013).



рисунок 3. Разрез высокочастотного звёздного датчика

А далее – этап выбора понравившегося варианта и разработка эскиза ЗД. В качестве фотоприёмника нами была выбрана ПЗС-матрица CCD 47-20 с обратной засветкой фирмы e2v ltd. (Великобритания). Эта матрица имеет размер светочувствительной области 1024×1024 пикселей с линейным размером 13,3 мкм, т.е. достаточно высокой ёмкости. Матрица обладает переносом кадра, в ней помимо светочувствительной области существует область такого же размера для хранения кадра. После завершения экспозиции электронное изображение быстро переносится в область хранения, откуда медленно считывается. А в светочувствительной области в это время может начаться экспозиция следующего кадра. Обратная засветка обеспечивает высокую однородность чувствительности и квантовую эффективность, превышающую в максимуме 90%, а разработанная изготовителем e2v технология (технология AIMO – Advanced Inverse Mode Operation) – низкие темновые шумы.

При рекомендованном фокусном расстоянии 500 мм матрица проецируется на 2 кв. градуса небесной сферы. В её поле зрения в среднем попадает 12 навигационных звёзд, которые должны регистрироваться с $SNR > 12$. Вблизи полюсов Галактики это

будут звезды до 11^m включительно (навигационные звёзды 11^m встречаются в бедных звёздами участках неба, наиболее многочисленными в бортовом каталоге являются навигационные звёзды 9^m). Для достижения указанного SNR при экспозиции 0,1 с диаметр объектива должен составлять 100 мм.

Линзовый объектив с фокусом 500 мм и апертурой 100 мм был бы очень тяжёл, поэтому была выбрана схема Ричи – Кретьена с афокальным компенсатором, содержащая вогнутое гиперболическое первичное зеркало диаметром 100 мм, выпуклое гиперболическое вторичное зеркало диаметром 48 мм и двухлинзовый афокальный компенсатор. Двухзеркальная схема позволяет уменьшить длину объектива до 270 мм. Использование афокального компенсатора устраняет кривизну изображения, что необходимо для матричных приёмников, а линзы вместе с блендой главного зеркала образуют вокруг матрицы пылегазозащищённый объём. Из-за малой кривизны линз и из близкого расположения к фокальной плоскости малыми остаются хроматические аберрации. Главная бленда объектива расположена на внутренней стороне корпуса ЗД, что позволяет не увеличивать его габариты.

Использование зеркальной оптики снимает проблему различия фокусировки объектива ЗД в воздухе и вакууме (Бессонов Р.В. и др., 2016).

Предложенная конструкция ЗД хорошо показала себя в ходе вибрационных и термовакуумных испытаний, проведённых НПО имени С.А. Лавочкина.

Внешний вид прототипа звёздного датчика показан на рисунке 2, а его разрез – на рисунке 3.

список литературы

Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Сметанин П.С. и др. Исследование погрешностей определения параметров ориентации прибора высокой точности БОКЗ-ВТ // Программа и тезисы пятой Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». 2016. С. 2-9.

Барабанов А.А., Милюков В.К., Москатиньев И.В., Нестерин И.М. и др. Релятивистский гравитационный эксперимент на околоземной орбите: концепция, технология и конфигурация космической группировки // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 3. С. 89-95.

Бессонов Р.В., Беличенко М.Л., Дементьев В., Загородний Д.С. Исследование ошибок определения координат энергетических центров изображений звезд на фотоприемной матрице прибора звездной ориентации // Программа и тезисы пятой Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». 2016. С. 2-15.

Гордиенко Е.С., Ивашкин В.В., Симонов А.В. Анализ устойчивости орбит искусственных спутников Луны и выбор конфигурации лунной навигационной спутниковой системы // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 40-55.

Дятлов С.А., Бессонов Р.В. Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов // Механика, управление и информатика. 2011. № 1. С. 11-31.

Загородний Д.С., Сокольский М.Н., Трегуб В.П., Полищук Г.С. Особенности конструкции объективов приборов звездной ориентации космических аппаратов на примере «ОЗК-ВТ» // Программа и тезисы пятой Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». 2016. С. 2-11.

Захаров А.И., Прохоров М.Е., Тучин М.С., Жуков А.О. Минимальные технические характеристики звездного датчика ориентации, необходимые для достижения заданной погрешности // Астрофизический бюллетень. 2013. Т. 68, № 4. С. 507-520.

Захаров А.И., Никифоров М.Г. Систематические и случайные ошибки определения положения фотоцентров звезд на матричных фотоприемниках // Механика, управление и информатика. 2011. № 2. С. 280-288.

Ковалевский Ж. Современная астрометрия. Фрязино: Век-2, 2004. 480 с.

Подобед В.В., Нестеров В.В. Общая астрометрия. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1982. 576 с.

Прохоров М.Е., Захаров А.И., Тучин М.С. Расчёт оптимальных характеристик оптической системы и матричного приёмника излучения звёздного датчика ориентации по его тактико-техническим характеристикам // Механика, управление и информатика. 2013. № 13. С. 80-90.

Стекольников О.Ю., Захаров А.И., Прохоров М.Е. Конструктивные особенности узкопольного звёздного датчика ГАИШ МГУ с зеркальным объективом // Механика, управление и информатика. 2013. № 13. С. 69-79.

Тучин М.С., Бирюков А.В., Захаров А.И., Прохоров М.Е. Учёт термогенерации матричных приборов с зарядовой связью как основа повышения точности звёздного датчика // Механика, управление и информатика. 2013. № 13. С. 249-256.

Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 248 с.

Høg E., Fabricius C., Makarov V.V., Urban S. et al. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // Astronomy and Astrophysics. 2000. V. 355. P. L27-L30.

Michaels D.L., Speed J.F. New Ball Aerospace star tracker achieves high tracking accuracy for a moving star field // Proceedings of SPIE. 2004. V. 5430. P. 43-52.

Статья поступила в редакцию 22.03.2017 г.

**МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ ОБЪЁМОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ
И КОЛИЧЕСТВА ЗАПУСКОВ
ПО ПРОГРАММЕ ВЫВЕДЕНИЯ
ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ В
КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО
ПРИ ПЕРЕОБОРУДОВАНИИ
МЕЖКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ
БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ В РАКЕТЫ
КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**METHOD OF JUSTIFICATION
OF EXPERIMENTAL
VERIFICATION SCOPE
AND NUMBER OF LAUNCHES
WITHIN THE PROGRAM
OF PAYLOADS INJECTION
IN SPACE AT RETROFIT OF
THE STRATEGIC INTERCONTINENTAL
BALLISTIC MISSILES INTO
INTEGRATED LAUNCH VEHICLES**



С.Н. Шевченко¹,
профессор, доктор
технических наук,
shevchenko.s@laspace.ru;
S.N. Shevchenko

В статье предложен метод обоснования объёмов экспериментальной отработки и программы выведения полезной нагрузки в космическое пространство при переоборудовании межконтинентальных баллистических ракет стратегического назначения в ракеты-носители космических аппаратов, позволяющих определять объёмы наземной экспериментальной отработки и лётных испытаний переоборудованных межконтинентальных баллистических ракет и объёмы их запусков по программе выведения полезной нагрузки в космическое пространство, такие, что затраты на их практическую реализацию будут минимальными.

Ключевые слова: межконтинентальная баллистическая ракета; ракета-носитель; экспериментальная отработка; программа выведения полезной нагрузки; стоимостные затраты; ожидаемый стоимостной ущерб; критерий оптимизации.

The article proposes the justification method for verification scope and number of launches within the program of payloads injection in space at retrofit of the strategic intercontinental ballistic missiles into spacecraft launch vehicles, allowing the scope assessment of ground experimental verification, flight testing of the converted intercontinental ballistic missiles and launches on the program of the payloads injection into space, such as that the costs on their practical implementation would be minimum.

Key words: intercontinental ballistic missile; launch vehicle; experimental verification; payload injection program; costs; expected value damage; optimization criterion.

¹ АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Lavochkin Association, Russia, Moscow region, Khimki.