

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ДАТЧИКОВ И ВОЗМОЖНЫЙ ПУТЬ ЕГО РЕШЕНИЯ

А.И. Гладышев¹,
доцент, кандидат
технических наук,
tolya_gladyshev@mail.ru;
A.I. Gladyshev

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

А.О. Жуков¹,
доцент,
доктор технических наук,
aozhukov@mail.ru;
A.O. Zhukov

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

THE QUESTION OF UPGRADE OF HIGH-PRECISION SOLAR SENSORS AND PRACTICABLE SOLUTION

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

А.Е. Ширшаков²,
кандидат технических наук,
shirshakov@laspace.ru;
A.E. Shirshakov

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

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

Наиболее распространёнными солнечными датчиками ориентации сегодня являются щелевые солнечные датчики и датчики с объективом «рыбий глаз». Серийно выпускаемые приборы, как зарубежные, так и отечественные, имеют точность порядка 1 угл. с. Однако развитие космической отрасли требует перехода к величинам с большими точностями ориентации. Проблемы, возникающие при попытке сделать современные звёздные датчики более точными, обсуждаются в приведённой статье.

Ключевые слова: солнечный датчик;
ориентация космического аппарата.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные датчики устанавливаются практически на всех современных космических аппаратах (КА), за исключением части микро- и наноспутников (Ефанов В.В., Долгополов В.П., 2016; Заславский Г.С. и др., 2016; Казмерчук П.В. и др., 2016). Они определяют направление на Солнце в системе координат, связанной с самим датчиком. Поскольку нам известно, как солнечный датчик установлен на КА, то можно определить направление на Солнце относительно КА или любого из установленных на его борту приборов. Знать положение Солнца необходимо для решения целого ряда задач: для правильной ориентации солнечных батарей КА, для защиты целевой аппаратуры от попадания прямых солнечных лучей, для наблюдения самого Солнца, а также для целей навигации и ориентации. При этом перечисленные цели требуют определения направления на Солнце с различной

Today the most common-used solar sensors are slit solar sensors and sensors with the «fish eye» lens. The series-produced devices, both foreign and inhouse have the accuracy about 1 angular second. However, the progress of space industry requires magnitudes with higher orientation accuracy. This article covers the problems occurring at attempt to increase the accuracy of the available star sensors.

Keywords: solar sensor;
spacecraft orientation.

точностью. Так, для наиболее эффективной работы солнечные батареи должны быть развёрнуты своими плоскостями к Солнцу, но отклонение в 10° снижает мощность батарей всего на 5%. Для защиты целевой аппаратуры направление на Солнце надо знать с точностью порядка градуса. А вот наблюдения Солнца и навигация по нему требуют существенно более высоких точностей – не меньше секунд дуги.

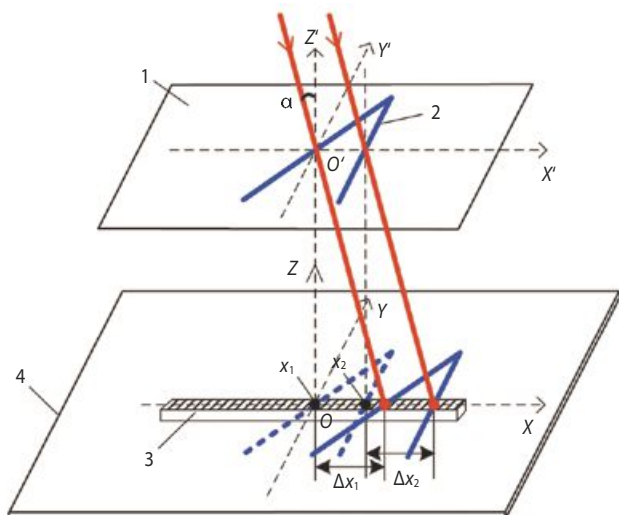
Существует довольно много конструкций солнечных датчиков (Черемухин Г.С., 2004). Наиболее общей характеристикой их устройства является наличие подвижных механических частей, которое упрощает конструкцию, повышает надёжность и снижает потребление энергии.

Наиболее точными и одновременно самыми распространёнными сегодня являются щелевые солнечные датчики и датчики с объективом «рыбий глаз».

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.

Щелевые датчики имеют очень простое устройство. Первой обязательной частью датчика этого типа является непрозрачная оптическая маска, в которой сделана одна или несколько узких прямых щелей, пропускающих солнечное излучение. Второй частью является фокальная плоскость, в которой расположена светочувствительная линейка или матрица (рисунок 1). Перед оптической маской иногда устанавливают светофильтр для ослабления солнечного излучения.



- 1 – оптическая маска;
- 2 – V-образная щель;
- 3 – линейный сенсор;
- 4 – фокальная плоскость.

рисунок 1. Схема щелевого солнечного датчика с V-образной щелью и линейным фотоприёмником (красным показаны лучи Солнца)

Оптическая маска и фокальная плоскость параллельны друг другу и разделены расстоянием, которое условно можно назвать «фокусным расстоянием» солнечного датчика.

Оптическая маска создаёт на фокальной плоскости изображение в виде набора ярких прямых линий, каждая из которых соответствует щели в оптической маске. Положение этих линий на матрице или места пересечения линий со светочувствительной линейкой фиксируются.

При смещении Солнца в направлении щели изображение соответствующей ей яркой линии на фокальной плоскости не изменяется. Смещение Солнца под некоторым углом к направлению щели приводит к смещению её изображения на фокальной плоскости. Используя маску с несколькими непараллельными щелями (маска с V-образной щелью – две непараллельные щели, маски с N- и Z-образными щелями – три щели, крайние из которых параллельны друг другу и т.п.), можно определить обе угловые координаты положения Солнца в поле зрения датчика даже с помощью линейного приёмника излучения (Ава-

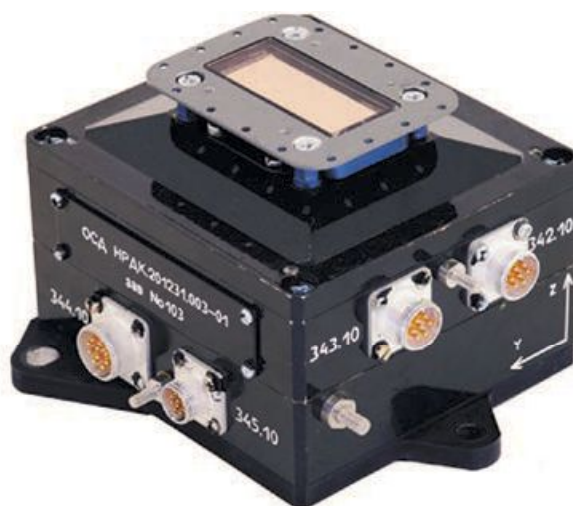


рисунок 2. Отечественный солнечный датчик ОСД (Оптический солнечный датчик, 2013)

несов Г.А. и др., 2009; Федосеев В.И., Колосов М.П., 2007). Внешний вид одного из промышленно выпускаемых солнечных датчиков показан на рисунке 2.

Частным случаем щелевого датчика можно считать камеру-обскуру, у которой в оптической матрице вместо щели сделано одно или несколько отверстий. Такой солнечный датчик может функционировать только с матричным приёмником излучения, на котором фиксируются положения ярких пятен от отверстий.

Щелевые датчики имеют достаточно высокую точность, порядка $1'$.

Поскольку размеры фотоприёмников, устанавливаемых в фокальной плоскости щелевых солнечных датчиков, не бесконечны, этот тип датчика имеет принципиально ограниченную ширину поля зрения. Например, датчик, показанный на рисунке 2, имеет поле зрения $62^\circ \times 120^\circ$, он считается широкоугольным, но при этом его поле зрения охватывает только $1/3$ полусферы ($1/6$ небесной сферы).

Можно расширить поле зрения солнечного датчика, если в один прибор установить несколько оптических масок и несколько приёмников излучения. Пример такого датчика показан на рисунке 3. Однако в таких датчиках есть зазоры между полями зрения, необходима их взаимная привязка и т.д.

Другой популярный сегодня тип солнечного датчика представляет собой камеру с матричным приёмником излучения и сверхширокоугольным объективом «рыбий глаз». Ширина поля зрения такого объектива может достигать 180° (2π стерадиан) и более. Если поле зрения датчика превышает 180° , его необходимо устанавливать на некоторой высоте над бортом КА (например, на вертикальной штанге), иначе края поля зрения объектива будут закрыты конструкциями КА. Солнечный датчик подобного типа отечественного производства показан на рисунке 4. Этот прибор имеет ширину поля зрения 180° и погрешность $1'$ в его пределах.



рисунок 3. Солнечный датчик БОКС-01 разработки НПП «Оптэкс» с двумя оптическими щелевыми масками и фотоприёмниками

1. Формулировка проблемы

Основное противоречие, которое необходимо преодолеть при создании высокоточных солнечных датчиков, вне зависимости от принципа их функционирования, может быть описано одной фразой «небо большое, а Солнце – маленькое». Конечно, надо дать пояснения.

Измерить направление на центр с точностью порядка угловой секунды или лучше очень легко. Для этого достаточно взять камеру (телескоп) с узким полем зрения порядка $1-2^\circ$. Если навести камеру на Солнце, то его изображение будет занимать существенную часть фотоприёмной матрицы. Положение центра Солнца по такому большому изображению можно найти с точностью до десятых и сотых долей пикселя несколькими способами, например как взвешенный фотоцентр изображения или как центр контура диска Солнца.

Солнечный датчик (СД) может функционировать только тогда, когда необходимое Солнце находится в его поле зрения (или в полях зрения, если у солнечного датчика несколько оптических головок). Упомянутая в предыдущем абзаце узкопольная камера требует для этого точного наведения на Солнце и постоянного сопровождения. Чтобы избежать необходимости слежения за Солнцем, т.е. сконструировать СД без подвижных частей, нужно иметь поле зрения до полусферы (2π стерадиан) или больше. Вопрос о возможности расширения полей зрения СД рассмотрен во введении.

Однако при увеличении поля зрения снижается разрешение получаемого изображения, т.к. увеличивается угловой размер проекции пикселя матричного фотоприёмника в проекции на небесную сферу. Ча-



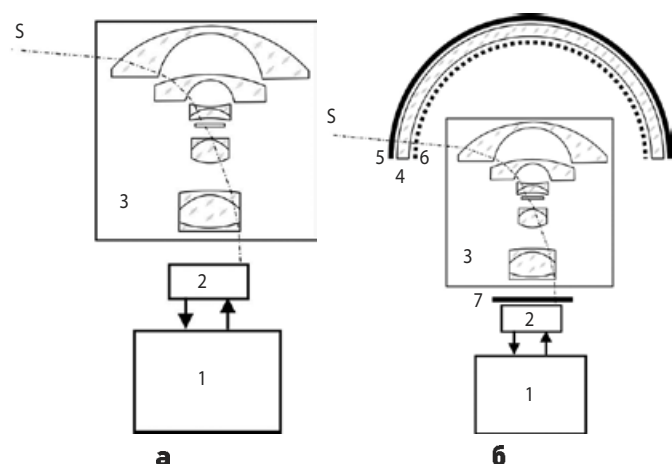
рисунок 4. Солнечный датчик 347K (НПП «Геофизика-Космос») со сверхширокоугольным объективом «рыбий глаз»

стично это ухудшение можно компенсировать, используя ПЗС или КМОП-матрицы большого размера, но возможность увеличения размеров матрицы сильно ограничена. Одновременно при использовании больших матриц возникает целый букет проблем: наличие технических ограничений на размер матрицы, большие матрицы дольше считываются, для хранения изображений с них требуются большие объёмы памяти и т.д.

Таким образом, в широкопольную камеру Солнце попадает почти всегда, но размер его изображения мал, что определяет высокую погрешность определения направления на него. В узкопольной камере точность определения направления высока, но вероятность случайного попадания Солнца в её поле зрения практически равна нулю, необходима сложная и точная система наведения и сопровождения («гидирования») прибора.

2. Возможный вариант решения

Поскольку мы хотим получить универсальный высокоточный солнечный датчик, который будет работать на любом КА, а не только на аппарате, специальным образом ориентированном относительно Солнца, то более перспективной нам кажется такая его конструкция, в которой нет подвижных частей, а поле зрения охватывает почти полусферу, но ещё лучше – точно полусферу или даже больше. Наиболее близкими свойствами обладают СД с объективом «рыбий глаз», но в них изображение Солнца будет очень маленьким. Угловой размер полусферы составляет 180° , а видимый угловой размер Солнца около $0,5^\circ$. Тогда при размере матричного фотоприёмника 1024×1024 пкс изображение Солнца на нём будет за-



- 1** – блок электроники солнечного датчика;
2 – матричный приёмник излучения;
3 – широкоугольный объектив («рыбий глаз»);
4 – мениск; **5** – интерференционный фильтр;
6 – матовая поверхность или рассеивающее покрытие;
7 – отсекающий фильтр; **S** – луч от Солнца.

рисунок 5. Схема устройства классического солнечного датчика с объективом «рыбий глаз» (а) и звёздного датчика с интерференционным мениском (б)

нимать 3×3 пкс. Это слишком мало для определения направления на центр Солнца с высокой точностью.

Решить возникающее противоречие можно, если оптическими методами преобразовать изображение Солнца таким образом, чтобы размеры его существенно увеличились при сохранении положения.

Нами предложена новая конструкция солнечного датчика (Захаров А.И. и др., 2015), сочетающая оба качества: широкое поле зрения и высокую (секундную) точность. В ней используется объектив типа «рыбий глаз» и матричный приёмник излучения с соответствующим блоком электроники для обработки изображений. Эта часть датчика подобна прибору 347К (рисунок 4), схематическое устройство которого показано на рисунке 5а.

В новой конструкции СД перед объективом устанавливается тонкий полусферический мениск, внутренняя поверхность которого матирована или на неё нанесено рассеивающее свет покрытие, а на внешнюю поверхность нанесён интерференционный фильтр, пропускающий свет в узком интервале длин волн. Объектив фокусируется не на бесконечность, а на внутреннюю поверхность мениска. Помимо этого между объективом и приёмником излучения установлен ещё один плоский светофильтр – отсекающий. Устройство нового СД показано на рисунке 5б.

Принцип действия прибора основан на смещении полосы пропускания интерференционного фильтра при изменении угла падения излучения (Котликов Е.Н. и др., 2009). На рисунке 6 показан пример смещения полосы пропускания (и изменения профиля пропускания) одного и того же фильтра при различных углах падения излучения.

Видно, что при нормальном падении фильтр пропускает излучение с наибольшей длиной волны, а по мере увеличения угла падения максимум пропускания смещается в сторону более коротких волн. Одновременно с ростом угла падения полоса пропускания становится шире и меняет форму (в приведённом примере – теряет симметричность), однако можно выбрать несколько углов падения, для которых полосы пропускания будут хорошо разделены.

Если мениск освещается Солнцем, то в подсолнечной точке угол падения равен нулю, фильтр пропускает наиболее «красные» лучи. По мере удаления от этой точки угол падения растёт, и сквозь него начинают проходить все более «синие» лучи. Матовое покрытие на внутренней стороне мениска рассеивает пропущенное фильтром излучение, и его можно регистрировать из любой точки внутри мениска, например, из его центра. Центр кольца совпадает с положением Солнца, которое показано для наглядности. На самом деле, в кадре Солнце не видно (на рисунках 7а и 7в угловой размер Солнца увеличен в 10 раз).

Рассмотрим, как работает предложенный СД (рисунок 7).

На рисунке 7а показано изображение, создаваемое на матричном фотоприёмнике «обычным» СД с объективом «рыбий глаз». На квадратном (или прямоугольном) матричном фотоприёмнике объектив «рыбий глаз» создаёт изображение верхней полусферы неба в виде круга, который целиком помещается в пределах фотоприёмника, т.е. диаметр которого меньше сторон матрицы. За пределы этого круга свет не попадает, т.е. сигнал там равен нулю (регистрируются только шумы фотоприёмника).

В некоторой точке внутри круга будет располагаться изображение Солнца. Оно невелико и занимает всего несколько пикселей (см. выше). Для наглядности на рисунке 7а угловой размер Солнца был увеличен в 10 раз (до 5°).

Яркость изображения неба в пределах круга зависит от уровня фона неба: в космосе он почти равен нулю, при наблюдениях с Земли – существенно выше. Дополнительный вклад в регистрируемый сигнал вносит излучение, рассеянное объективом. Поэтому изображение неба на рисунке 7а показано серым цветом. В любом случае сигнал в изображении Солнца будет во много раз выше.

Если мы теперь установим перед объективом мениск так, чтобы объектив оказался в его центре, и «посмотрим» на внутреннюю поверхность мениска, то увидим изображение, показанное на рисунке 7б (объектив сфокусирован на внутреннюю рассеивающую поверхность мениска). Как и в предыдущем случае, изображение имеет вид круга, который целиком помещается в пределах матричного фотоприёмника. Солнце на этом изображении не видно. Часть поверх-

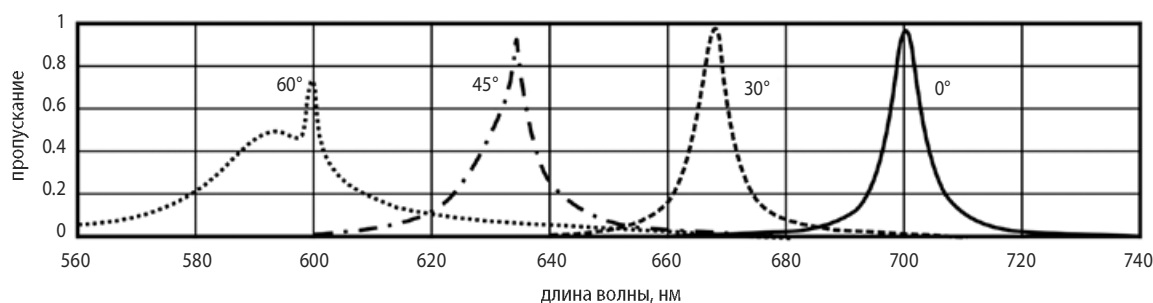


рисунок 6. Пример изменения полосы пропускания узкополосного интерференционного фильтра с ростом угла падения излучения

ности мениска не освещена — это чёрный полумесяц на стороне, противоположной Солнцу. На освещённой части мениска наблюдается градиент длин волн («цвета») пропущенного излучения — в направлении на Солнце (в подсолнечной точке, где излучение падает на мениск по нормали к поверхности) проходит наиболее длинноволновое излучение, а по мере отклонения от этого направления фильтр пропускает все более коротковолновое излучение (рисунок 7б).

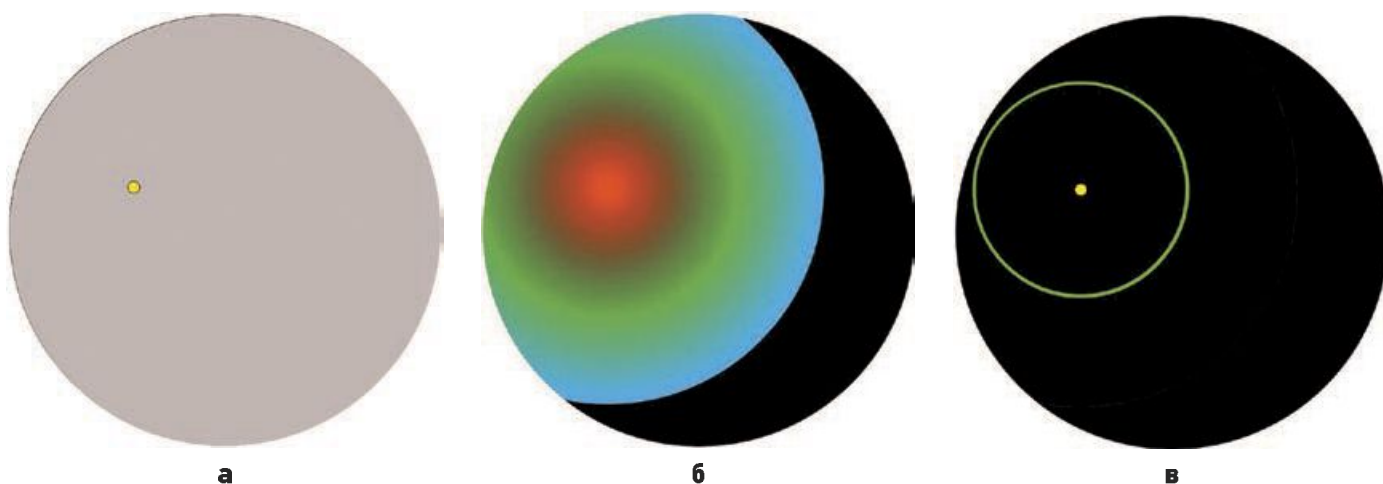
Теперь добавим в конструкцию СД отсекающий светофильтр, который пропускает узкую полосу излучения с длиной волны, соответствующей пропусканию фильтра на мениске при углах падения в 30–50° (т.е. зелёному цвету на рисунке 7б). После добавления отсекающего светофильтра изображение на матрице примет вид, показанный на рисунке 7в. Изображение принимает вид монохроматического яркого кольца на тёмном фоне. Если дальняя от центра кадра часть кольца выйдет за пределы кругового изображения, создаваемого объективом, то в кадре будет видно не кольцо, а дуга большей или меньшей протяжённости. На небесной сфере это кольцо представляет собой правильный круг, точно в центре которого находится Солнце.

3. Особенности солнечного датчика с интерференционным мениском

Дисторсия объектива искажает форму кольца, его изображение занимает намного большее число пикселей, чем изображение Солнца, построенное непосредственно объективом «рыбий глаз», что обязательно нужно учитывать при определении центра кольца, т.е. направления на Солнце (на рисунке 7в положение Солнца отмечено для наглядности, хотя в реальном кадре изображения Солнца внутри яркого кольца нет).

Приведём эти оценки. Пусть изображение строится на КМОП-матрице размером 1024×1024 пкс, объектив «рыбий глаз» строит изображение верхней полусферы на этой матрице в виде полукруга диаметром 1000 пкс. При пикселях с геометрическим размером 5–6 мкм (широко распространённые значения у современных оптических матриц) ёмкость пикселя составляет около 8000 электронов. Приведённые здесь значения параметром КМОП достаточно типичны и пригодны для получения оценок.

Если в поле зрения объектива попадает вся верхняя полусфера, то средний угловой размер проекции пикселя на небо при приведённых выше параметрах будет



а — обычный датчик с объективом «рыбий глаз»: серый круг — изображение верхней полусферы, создаваемое круговым «рыбым глазом», жёлтый кружок — Солнце; **б** — вид внутренней поверхности мениска из его центра: чёрный серп — неосвещённая часть мениска, наиболее красная точка в центре градиента соответствует направлению на Солнце (которое не видно); **в** — изображение после отсекающего фильтра: кадр тёмный, за исключением кольца, длина излучения в котором пропускается отсекающим фильтром.

рисунок 7. Изображения Солнца в солнечных датчиках

составлять $\theta = 180/1000 = 0,18^\circ \approx 11' \approx 650''$. Так как видимый угловой размер Солнца примерно равен $32'$, то его изображение на матрице будет занимать 3×3 пкс.

Пусть длительность экспозиции выбирается таким образом, чтобы пиксели, полностью занятые изображением Солнца, заполнялись наполовину максимальной ёмкости, т.е. до 4000 электронов. В полном изображении Солнца будет содержаться $N_1 = 3 \times 3 \times 4000 = 36000$ фотоэлектронов. Солнце очень яркий источник, следовательно, необходимая экспозиция будет очень короткой, а вклад темновых токов в зарегистрированный сигнал – пренебрежимо малым. Накопление квантов света подчиняется статистике Пуассона, соответственно, отношение сигнала к шуму в изображении Солнца будет составлять $SNR_1 = N_1^{1/2} \approx 190$. Отсюда положение центра изображения Солнца мы сможем определить со следующей случайной ошибкой:

$$\Delta_1 = \theta / SNR_1 \approx 3,5''.$$

Погрешность современных промышленных солнечных датчиков составляет $\sim 1'$ (как у 347К, т.е. примерно в 20 раз больше), это связано с систематическими ошибками приборов.

Рассмотрим теперь солнечный датчик с интерференционным мениском. Пусть он использует ту же матрицу и объектив «рыбий глаз», что и рассмотренный выше датчик. Пусть параметры фильтра на мениске и отсекающего фильтра выбраны так, что изображение Солнца имеет вид кольца с угловым диаметром 60° . На матрице оно примет вид вытянутого кольца с диаметром 300 пкс, длина контура составит соответственно около 1000 пкс. Пусть в датчике используются фильтры с узкими полосами пропускания, тогда толщина кольца будет определяться угловым размером Солнца и составит те же минимальные 3 пкс. В этом случае кольцо будет занимать на матрице около 3000 пкс. При том же 50% от максимального заполнения пикселей в изображении будет накоплено $N_2 = 3000 \times 4000 = 12\,000\,000$ фотоэлектронов. Аналогично, отношение сигнала к шуму составит $SNR_2 = N_2^{1/2} \approx 3500$, а случайная ошибка положения центра кольца

$$\Delta_2 = \theta / SNR_2 \approx 0,2'',$$

что примерно в 20 раз меньше, чем просто для объектива «рыбий глаз». Если фильтры будут более широкими, толщина кольца может превысить минимальные 3 пкс, величины N_2 и SNR_2 возрастут, а случайная погрешность направления на Солнце уменьшится.

закключение

Предложенный прибор имеет поле зрения, заметно превышающее 180° . Так, если Солнце расположено на 90° от оси прибора (на условном «горизонте»), то в кадре будет присутствовать половина кольца. Это

увеличит случайную погрешность определения направления на Солнце примерно в 1,4 раза, но прибор будет вполне работоспособен. При угловом радиусе кольца, равном 60° , прибор сможет работать, пока в кадре будет присутствовать заметная часть кольца, т.е. пока угол между осью прибора и Солнцем не превышает примерно 135° (примерно на 45° ниже условного «горизонта» прибора). Это соответствует полю зрения $270 \times 270^\circ$. Конечно, поле шириной более 180° будет реализовано, только если Солнце не будет экранироваться корпусом КА. Для этого, например, солнечный датчик можно установить на штанге. Установка двух противоположно ориентированных солнечных датчиков на разных сторонах КА позволит охватить всю небесную сферу.

список литературы

Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Зарецкая Е.В., Куделин М.И. и др. Оптический солнечный датчик. Особенности конструкции и испытательного оборудования // Механика, управление и информатика. 2009. № 1. С. 78-89.

Ефанов В.В., Долгополов В.П. Луна. От исследования к освоению (к 50-летию космических аппаратов «ЛУНА-9» и «ЛУНА-10») // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 3-9.

Заславский Г.С., Захваткин М.В., Степаньянц В.А., Тучин А.Г. и др. Баллистико-навигационное обеспечение управления полётом КА и выполнения научной программы проекта «РАДИОАСТРОН». 5 лет полёта // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 3. С. 25-37.

Захаров А.И., Прохоров М.Е., Жуков А.О. Способ измерения угловых координат Солнца и реализующее его устройство // Патент RU 2555216. 10.07.2015. (в печати).

Оптический солнечный датчик // Сайт отдела оптико-физических исследований Института космических исследований Российской академии наук. Дата обновления: 28.06.2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://ofo.ikiweb.ru/osd.php> (дата обращения: 19.06.2017).

Казмерчук П.В., Мартынов М.В., Москатиных И.В., Сысоев В.К. и др. Космический аппарат «ЛУНА-25» – основа новых исследований Луны // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 9-19.

Котликов Е.Н., Варфоломеев Г.А., Лавровская Н.П., Тропин А.Н. и др. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий. СПб.: ГУАП, 2009. 189 с.

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

Черемухин Г.С. Приборы ориентации на Солнце для космических аппаратов. М.: Воентехиниздат, 2004. 384 с.

Статья поступила в редакцию 20.06.2017 г.