

УДК 520.6-17

МИНИМАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА ОРИЕНТАЦИИ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОЙ ПОГРЕШНОСТИ

© 2013 А. И. Захаров^{1*}, М. Е. Прохоров^{1**}, М. С. Тучин^{1***}, А. О. Жуков^{2****}

¹Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 26 июня 2013 года; принята в печать 10 сентября 2013 года

В статье описываются принципы расчета минимально необходимых характеристик оптической системы и матричного приемника излучения звёздного датчика ориентации, которые позволяют достигнуть требуемой погрешности определения ориентации для заданной экспозиции. В расчете предполагается, что на погрешность ориентации влияют только случайные шумы различного происхождения, а все систематические погрешности устранены. Приведены характеристики, необходимые для датчиков различного назначения. Показано, что в существующих звёздных датчиках ориентации погрешность превышает минимально достижимую на порядок величины из-за неучтенных систематических погрешностей. Обсуждаются виды таких погрешностей и способы их устранения или учёта.

Ключевые слова: *космические аппараты—аппаратура: детекторы—методики: обработка изображений*

1. ВВЕДЕНИЕ

Современный звёздный датчик ориентации (ЗД) состоит из оптической системы (объектива), матричного приемника излучения (ПЗС или КМОП) и блока электроники. Такая схема ЗД практически полностью вытеснила использовавшиеся ранее [1]. Подобный ЗД функционирует следующим образом: на матричном приемнике экспонируется кадр с изображением звёздного неба, в нём выделяются изображения звёзд и определяются их координаты. Звёзды в кадре или часть этих звёзд отождествляются со звёздами в бортовом навигационном каталоге, который содержит координаты звёзд в одной из небесных систем координат. Сравнение небесных координат звёзд с их положениями в кадре позволяет определить ориентацию ЗД — небесные координаты центра кадра и угол его поворота относительно направления на северный полюс мира.¹

*E-mail: zakh@sai.msu.ru

**E-mail: mike.prokhorov@gmail.com

***E-mail: wizard81@mail.ru

****E-mail: aozhukov@mail.ru

¹ЗД может выдавать ориентацию в другом виде, например, в виде трех углов Эйлера, кватерниона ориентации или матрицы трехмерного поворота [2].

Погрешность ориентации определяется несопадением центров изображений звёзд в кадре и их координат из бортового каталога. Координаты звёзд определяются погрешностями астрометрических каталогов. Для ярких звёзд лучшие измерения координат с погрешностью порядка миллисекунды дуги содержатся в каталогах, которые были построены по результатам космического эксперимента Hipparcos и их последующим уточненным версиям [3–5]. Для более слабых звёзд координаты известны с погрешностью порядка $0''.1-0''.01$. Для большинства ЗД² погрешности координат в бортовых каталогах пренебрежимо малы по сравнению с погрешностью самих датчиков.

Погрешности положения изображений на матричном фотоприемнике складываются из случайной и систематической составляющих. В случайную составляющую входят квантовые флуктуации регистрируемого сигнала, а также шумы фона и другие шумы. К систематическим погрешностям относятся абберации оптических систем, неоднородности фона и чувствительности приемника излучения и т.п. Подробнее вопросы о систематических погрешностях рассмотрены в Разделе 8.

²В том числе для всех серийных промышленно выпускаемых ЗД.

В то время как систематические погрешности можно измерить в ходе лабораторных и полетных калибровок ЗД и учесть при обработке наблюдений, случайные погрешности не устранимы принципиально. Пытаться сделать остаточные (неустраненные) погрешности существенно меньшими, чем случайные, не имеет смысла. Случайные погрешности определения координат изображений звёзд зависят от параметров объектива и приемника излучения ЗД, поэтому их характеристики изначально надо выбирать такими, чтобы обеспечить функционирование ЗД с требуемой точностью.

В Разделе 2 сформулирована постановка задачи. В Разделе 3 перечислены основные технические характеристики ЗД. В Разделе 4 приведены математические соотношения, связывающие основные технические характеристики ЗД с погрешностью определения им ориентации. В Разделе 5 перечислены дополнительные ограничения на параметры ЗД, имеющие техническую и технологическую природу. В Разделе 6 приведена последовательность шагов для определения оптимальных характеристик ЗД, которые позволяют достичь требуемой погрешности измерений при заданной длительности экспозиции. Рассчитанные на основе этого алгоритма характеристики ЗД, предназначенных для различных применений, приведены в Разделе 7. Раздел 8 посвящен источникам систематических ошибок в ЗД и способам их устранения. В Разделе 9 обсуждаются выводы работы.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В этой работе нас будет интересовать следующая задача — какие характеристики должны иметь объектив, приемник излучения и другие системы ЗД, который будет определять положение центра кадра с погрешностью не хуже σ' при длительности экспозиции τ .³

При этом дополнительно будем требовать, чтобы указанная погрешность ориентации σ' достигалась с вероятностью не ниже P на любом участке неба. Вращение ЗД будет предполагаться медленным, поскольку учет смазывания изображения — тема отдельной работы.

3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗД

Основными параметрами объектива являются фокусное расстояние F , размер (диаметр) входного зрачка D и размер изображения точечного

³При этом, естественно, частота опроса ЗД не может превышать $1/\tau$.

источника излучения.⁴ К параметрам матричного приемника излучения относятся линейный размер пиксела $d \times d$, число пикселей в матрице приемника $M \times M$, спектральный диапазон чувствительности приемника излучения $\Delta\lambda$ и средняя квантовая эффективность в нем Q_{eff} , а также термогенерация электронов N_{bg} (темновой ток) и шумы считывания σ_{rd} .

Минимальное число изображений звёзд в кадре, которые должны быть отождествлены с бортовым каталогом для возможности функционирования ЗД, равно 2, максимальное — определяется объемом бортового каталога, оперативной памяти и производительностью блока электроники ЗД. Чем больше число используемых звёзд и чем выше их блеск, тем меньше погрешность определения ориентации. Зависимость погрешности ориентации от числа звёзд связана с возможностью усреднения измерений, обычно погрешность ориентации убывает обратно пропорционально квадратному корню из числа звёзд. Влияние блеска заключается в том, что для более ярких звёзд случайная составляющая погрешности определения положения их изображений ниже.

Заметим, что среднее число звёзд ярче заданной звёздной величины на единицу поверхности небесной сферы меняется примерно в десять раз: максимум приходится на плоскость Галактики вблизи ее центра, а минимум — на полюса Галактики.⁵ Максимальная погрешность определения ориентации соответствует наблюдению наиболее бедных областей неба, т.е. окрестностей полюсов Галактики.

При вращении космического аппарата, на котором установлен ЗД, изображения звёзд смазываются. Из-за этого они занимают большее число пикселей, и возрастают суммарные шумы. В результате увеличиваются погрешности определения положений изображений звёзд в кадре и, как следствие, погрешности ориентации. В этой работе мы будем рассматривать только случай медленного вращения, при котором смазывание изображения звезды за время экспозиции не превышает одного пиксела кадра и практически не сказывается на погрешности определения ориентации.

4. ВЗАИМОСВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЗД С ПОГРЕШНОСТЬЮ ОРИЕНТАЦИИ

Покажем, как связаны с другими характеристиками конструкции ЗД погрешность определения ориентации σ' и длительность экспозиции τ .

⁴Размером изображения точечного источника будем считать характерный размер изображения в фокальной плоскости, содержащий заданную долю сигнала от этого источника.

⁵Это не так для самых ярких звёзд.

1. Пусть изображение звезды в кадре занимает область $k \times k$ пикселей. Причем $k > 1$ и не меняется в пределах кадра.

2. Погрешность измерения положения фотоцентра изображения отдельной звезды в кадре ЗД σ определяется угловым размером пиксела θ и отношением сигнала к шуму для измерения звезды SNR (см., например, [6, 7])

$$\sigma = C_\sigma \frac{\theta}{\text{SNR}}. \quad (1)$$

Здесь C_σ — безразмерный коэффициент пропорциональности, его точное значение зависит от профиля распределения величины сигнала в изображении точечного источника излучения, но обычно близко к 1 (далее полагаем $C_\sigma = 1$). Это основное соотношение для расчета характеристик ЗД. Оно справедливо только в случае, когда изображение звезды занимает несколько пикселей ($k > 1$). Его применение имеет следующие ограничения:

- если отношение размера изображения звезды к размерам пиксела существенно меньше единицы (субпиксельный режим, $k = 1$), то координаты звезды определяются с точностью до пиксела;
- если чувствительность приемника сильно меняется внутри пиксела,⁶ то размер изображения выбирается из соображения усреднения этой неоднородности (k не менее 4–5 пикселей);
- для приемника с однородной внутрипиксельной чувствительностью⁷ оптимальным для определения положения фотоцентра является изображение размером 1.5–2 пиксела [6].

Оптимальный размер изображения звезды может быть обеспечен конструкцией оптической системы ЗД или, если дифракционное изображение звезды меньше оптимального размера, расфокусировкой изображения.

3. Угловой размер пиксела θ связан с его линейным размером d и фокусным расстоянием объектива F следующим соотношением

$$\theta = \frac{d}{F}.$$

Тогда формула (1) приобретает вид

$$\sigma = C_\sigma \frac{d}{F \times \text{SNR}}. \quad (2)$$

4. Поле зрения звёздного датчика определяется форматом кадра $M \times M$ пикселей. Размер поля зрения по стороне кадра будет равен

$$\psi_1 \approx \frac{Md}{F}, \quad (3)$$

а по диагонали, соответственно,

$$2\omega \approx \frac{\sqrt{2}Md}{F}. \quad (4)$$

Телесный угол области неба, проецирующейся на приемник излучения, составляет

$$\Omega \approx \left(\frac{Md}{F}\right)^2 \text{ стерадиан} \quad (5)$$

(1 стерадиан $\approx 3282.8 \square^\circ$). Эти соотношения точны для малых углов полей зрения, при использовании широкоугольных объективов необходимо учитывать искажения, возникающие при проецировании небесной сферы на плоский матричный приемник излучения. Соотношения записаны для квадратного кадра $M \times M$ с квадратным пикселем $d \times d$. Они легко обобщаются на случай прямоугольной геометрии кадра.

5. Отношение сигнала к шуму в изображении звезды зависит от шумов приемника (квантовых флуктуаций накопленного теплового сигнала и шумов считывания), а также квантовых флуктуаций сигнала [8]

$$\text{SNR} = \frac{N_* \tau}{\sqrt{N_* \tau + k^2 (N_{\text{bg}} \tau + \sigma_{\text{rd}}^2)}}, \quad (6)$$

где N_{bg} — поток электронов фона в пикселе,⁸ N_* — поток электронов от звезды, τ — длительность экспозиции, σ_{rd}^2 — дисперсия шума считывания, k^2 — число пикселей на которые попало излучение звезды. Видно, что для ярких звёзд $\text{SNR} \propto \sqrt{N_*}$, а для слабых звёзд $\text{SNR} \propto N_*$. Естественно, отношение сигнала к шуму для звезды предельной величины не должно быть ниже некоторого минимального значения ($\text{SNR} \geq \text{SNR}_{\text{min}} \geq 3$),⁹ обеспечивающего надежную регистрацию таких звёзд.

6. Поток зарегистрированных электронов от звезд

⁸ Определяется, в основном, термогенерацией электронов в кремнии, которая зависит от температуры кристалла ПЗС или КМОП.

⁹ Это значение может изменяться в зависимости от требуемых уровней вероятности обнаружения звезды и вероятности ложного обнаружения.

⁶ Типичная ситуация для матричных ПЗС и КМОП с прямой засветкой.

⁷ Например, матричные ПЗС или КМОП с обратной засветкой.

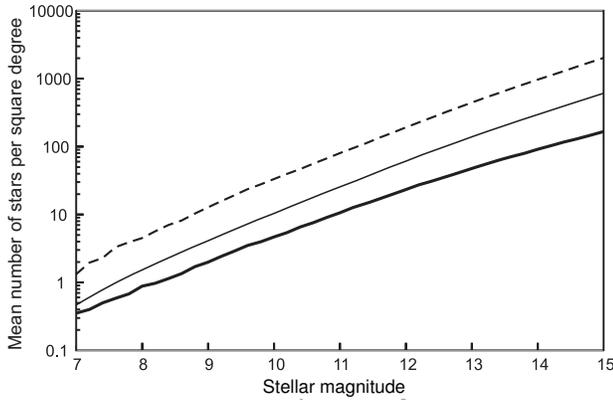


Рис. 1. Средние плотности звёзд ярче данной звёздной величины для ПЗС с обратной засветкой. Средняя плотность по всему небу — тонкая линия, штрихи — плотности в регионах с максимальным числом звёзд и толстая линия — с минимальным.

ды¹⁰ зависит от входной апертуры объектива ЗД

$$N_* = \eta F_* = \eta \pi \frac{D^2}{4} f_*,$$

где $\eta = Q_{\text{eff}} Q_{\text{opt}}$ — произведение средней квантовой эффективности приемника излучения Q_{eff} на средний коэффициент пропускания оптической системы Q_{opt} , f_* — освещенность, создаваемая звездой, D — диаметр входного зрачка объектива, F_* — поток фотонов, падающий на входной зрачок. Эти величины могут быть выражены через SNR следующим образом:

$$\begin{aligned} \eta F_* &= N_* \\ &\geq \text{SNR}^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 4k^2 (\sigma_{\text{rd}}^2 + N_{\text{bg}} \tau) \text{SNR}^{-2}}}{2\tau}. \end{aligned} \quad (7)$$

7. Согласно закону Погсона [9, 10], звёздная величина связана с потоком излучения звезды логарифмическим законом

$$m_* = -2.5 \log \frac{f_*}{f_{m=0}},$$

где $f_{m=0}$ — освещенность, создаваемая звездой нулевой звёздной величины.

8. Предельная величина звезды m_{lim} , которая может быть зарегистрирована ЗД за время экспозиции τ с отношением сигнала к шуму не ниже SNR, определяется соотношением

$$m_{\text{lim}} = -2.5 \log \frac{4F_*}{\pi D^2 \tau f_{m=0}}. \quad (8)$$

¹⁰Мы не делаем различий между оцифрованным сигналом и числом зарегистрированных электронов от звезды. Это практически не сказывается на решении.

9. Оценим среднее число звёзд, требуемой звёздной величины, которые попадают в поле зрения ЗД. В зависимости от используемого алгоритма определения ориентации в поле зрения ЗД должно находиться не менее n_* навигационных звёзд, т.е. звёзд, изображения которых отождествлены с бортовым каталогом, и которые регистрируются с отношением сигнала к шуму не ниже требуемого. Значение n_* не может быть меньше 2. Число звёзд в поле зрения ЗД при его произвольной ориентации описывается распределением Пуассона¹¹ со средним, равным среднему числу звёзд \bar{n}_* в области неба, куда направлен ЗД. Тогда вероятность ξ появления в поле зрения не менее n_* звёзд при их среднем числе \bar{n}_* определяется нелинейным уравнением

$$\xi = 1 - \exp(-\bar{n}_*) \times \left(1 + \sum_{k=1}^{n_*-1} \frac{\bar{n}_*^k}{k!} \right). \quad (9)$$

Это уравнение легко решается относительно \bar{n}_* при заданных значениях ξ и n_* . Например, для того чтобы в поле зрения ЗД находились две или более звёзд ($n_* = 2$) с вероятностью $\xi = 0.997$, среднее число звёзд в поле зрения ЗД должно составлять $\bar{n}_* \approx 8$. Средняя плотность звёзд в различных областях неба оценивается с помощью фотометрических каталогов, полных до достаточно больших звёздных величин. Приведенные в них величины звёзд в различных фотометрических полосах должны быть пересчитаны в полосу спектральной чувствительности широкополосного приемника излучения ЗД. Результаты, полученные для типичной кривой спектральной чувствительности кремниевой ПЗС-матрицы с обратной засветкой [11], приведены на Рис. 1 и в Таблице 1. Метод подобного пересчета звёздных величин описан в [12, 13]. Используя данные о средней плотности звёзд \bar{n}_* в областях полюсов Галактики, можно рассчитать, какая звёздная величина требуется для бесперебойной работы ЗД, а также определить, какая максимальная погрешность ориентации будет достигаться, когда в поле зрения ЗД оказывается минимальное число звёзд, равное n_* .

10. Среднее число звёзд, попадающих на матрицу ЗД, определяется плотностью звёзд на небе, предельной звёздной величиной и телесным углом на небесной сфере, занимаемым изображением кадра ЗД. Минимум числа звёзд наблюдается

¹¹Поскольку положения всех звёзд на небе известны (как правило, до больших величин, чем используемые в ЗД), то для любого заданного положения поля зрения ЗД мы имеем дело не с распределением Пуассона, а с его фиксированной реализацией.

Таблица 1. Среднее число звёзд ярче заданной величины на квадратном градусе

| Звёздная величина | Средняя плотность звёзд | | | Звёздная величина | Средняя плотность звёзд | | |
|----------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|
| | всё небо | полюс Галактики | плоскость Галактики | | всё небо | полюс Галактики | плоскость Галактики |
| 5.0 | 0.05 | 0.04 | 0.08 | 10.0 | 10.4 | 4.68 | 33.2 |
| 6.0 | 0.15 | 0.13 | 0.32 | 11.0 | 25.5 | 10.6 | 80.0 |
| 7.0 | 0.47 | 0.35 | 1.32 | 12.0 | 61.2 | 23.2 | 192 |
| 8.0 | 1.53 | 0.88 | 4.51 | 13.0 | 139 | 47.6 | 446 |
| 9.0 | 4.10 | 1.99 | 12.8 | 14.0 | 297 | 91.2 | 968 |

вблизи полюсов Галактики:

$$\bar{n}_* = \bar{n}_{\text{гр}}(m_{\text{lim}}) \times \Omega = \bar{n}_{\text{гр}}(m_{\text{lim}}) \times \left(\frac{Md}{F}\right)^2,$$

где $\bar{n}_{\text{гр}}(m_{\text{lim}})$ — плотность звёзд ярче предельной звёздной величины m_{lim} в Галактическом полюсе (см. Рис. 1 и Таблицу 1).

11. Если для определения ориентации используется число звёзд n_* , большее минимального (две звезды), то погрешность определения ориентации по их совокупности σ' составит

$$\sigma' = C_\sigma \theta \times \text{SNR}^{-1} (2n_* - n_{\text{пар}})^{-1/2}, \quad (10)$$

здесь $n_{\text{пар}}$ — число определяемых параметров ориентации ($n_{\text{пар}} = 3$). Заметим, что в этой формуле предполагается, что все навигационные звёзды имеют звёздную величину, равную m_{lim} , т.е. являются предельно слабыми. В действительности это не так, поэтому величина погрешности при реальном наборе навигационных звёзд, попадающих в кадр, как правило, меньше, чем приведенная выше оценка.

12. Из предыдущего соотношения можно получить число навигационных звёзд в кадре n_* , которое необходимо для достижения требуемой точности ориентации

$$n_* > \frac{1}{2} \left(\left(\frac{C_\sigma \theta}{\sigma' \times \text{SNR}} \right)^2 + n_{\text{пар}} \right). \quad (11)$$

5. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Помимо соотношений, перечисленных в Разделе 4, на параметры ЗД накладывается ряд ограничений, вызванных современным развитием технологии. Большинство из них имеет вид неравенств.

1. Отношение дифракционного размера изображения звезды к линейному размеру пиксела должно быть меньше оптимального $p = 1.5-2$ [14]:

$$\frac{2.44\lambda}{D} \frac{F}{d} < p,$$

здесь λ — эффективная длина волны для приемника излучения ЗД. В этом соотношении предполагается, что объектив ЗД обладает осевой симметрией.

2. Имеются существенные технические проблемы при изготовлении линзовой оптической системы большого диаметра или зеркальной — малого. Примем, что диаметр линзовых объективов для ЗД не превышает 10 см, а зеркальных — не может быть меньше 5 см.

3. Теоретически невозможно построить оптическую систему со светосилой более 1 : 0.5 [15]. Реальные технологические ограничения на светосилу более жесткие, для линзовых объективов она обычно не превышает 1 : 2 ($F > 2D$), а для зеркальных и зеркально-линзовых — 1 : 4 ($F > 4D$).

4. Аберрации оптической системы ограничивают размер поля зрения объектива ЗД. Примем для зеркальных объективов размер поля зрения $2\omega < 6^\circ$, а для линзовых — $2\omega < 60^\circ$.

5. Выпускаются фоточувствительные ПЗС- и КМОП-матрицы с размерами пиксела d от 1.67 до 30 мкм.

6. Форматы промышленно выпускаемых матриц M лежат в интервале от 128 до 8192 пикселей (по одной стороне) и часто кратны степени двойки. В ближайшие годы возможно появление матриц с длиной стороны более 16 000 пикселей. По специальному заказу возможно изготовление матриц форматом менее 128 пикселей.

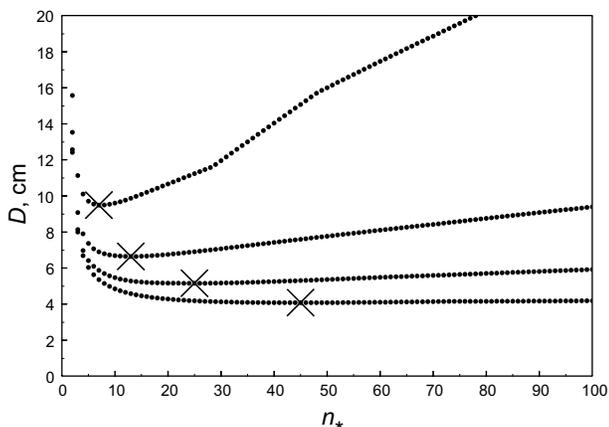


Рис. 2. Зависимость $D(n_*)$ для ЗД с матрицей форматом 1024×1024 пиксела с линейными размерами 12 мкм. Кривые соответствуют фокусным расстояниям $F = 100, 250, 500$ и 1000 мм (снизу вверх). Крестами отмечены минимумы зависимостей.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТИВА И МАТРИЦЫ ПО ЗАДАНЫМ ПОГРЕШНОСТИ И ЭКСПОЗИЦИИ

Погрешность ориентации σ' (на уровне 1 СКО нормального распределения) и длительность экспозиции τ будем считать заданными.

Зададим также дискретные наборы значений, которые могут принимать такие параметры ЗД, как размер пиксела d , формат матрицы $M \times M$ и фокусное расстояние объектива F . Например,

$$d = [6, 9, 12, 16, 24, 30] \text{ мкм,}$$

$$M = [128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192] \text{ пиксела,}$$

$$F = [1, 2, 4, 8, 15, 30, 50, 75, 100, 150, 200] \text{ см}$$

(возможны другие наборы значений).

Для каждого из возможных сочетаний d , M и F выполняем следующие действия.

1. Вычисляем угловой размер пиксела θ , ширину 2ω и телесный угол Ω поля зрения.
2. Задаем число навигационных звезд n_* , попадающих в кадр. В качестве начального значения возьмем минимальное возможное $n_* = 2$.
3. Определяем предельную звёздную величину m_{lim} и поток квантов излучения f_* от навигационных звезд следующим образом.

а) Для текущего значения n_* и заданной вероятности ξ (например, $\xi = 0.997$, что соответствует нормальному отклонению 3σ) находим среднее значение числа звезд \bar{n}_* в кадре. Для этого необходимо решить нелинейное уравнение (9).

б) Вычисляем среднюю плотность звезд, которая равна n_*/Ω .

с) Считая, что полученное значение средней плотности звезд относится к полюсам Галактики, т.е. является минимальным, найдём предельную звёздную величину m_{lim} , для которой такая плотность достигается. Для этого выполняется интерполяция данных из Таблицы 1.

д) Определяем освещенность f_* (поток квантов, падающих на единицу поверхности) от звезды предельной звёздной величины m_{lim} по закону Погсона [10].

4. Для заданного n_* независимо определяем необходимое отношение сигнала к шуму SNR и соответствующее число квантов от звезды F_* , которое должно быть для этого зарегистрировано:

а) зная заданную погрешность измерений σ' , угловой размер пиксела θ и число навигационных звезд в кадре n_* , по формуле (10) найдем SNR, эта величина не должна быть меньше SNR_{min} достаточного для обнаружения звезд, в противном случае вместо SNR возьмём SNR_{min} ;

б) зная величину SNR и шумовые характеристики приемника излучения, по формуле (7) найдем число фотонов F_* от одной навигационной звезды предельной звёздной величины, которые должны попасть на входной зрачок объектива ЗД за время экспозиции.

5. Диаметр входного зрачка объектива определяем по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{F_*(n_*)}{f_*(n_*)}}.$$

6. Полученные значения параметров запоминаем.

7. Число звезд в кадре n_* увеличиваем на единицу.

8. Если $n_* < n_{max}$, возвращаемся к п. 2 этой процедуры. Значение n_{max} выбираем в пределах 10–1000 в зависимости от емкости оперативной памяти ЗД.

9. После выполнения предыдущей части процедуры построим зависимость $D(n_*)$. Типичные примеры этих зависимостей показаны на Рис. 2. Видно, что в большинстве случаев при некотором $n_* > 2$ значение $D(n_*)$ достигает минимума.

10. Выберем оптимальную пару значений n_* и D . Это делается следующим образом:

а) если в зависимости $D(n_*)$ есть минимум, то в качестве оптимальных значений n_* и D берем пару, соответствующую минимальному значению $D(n_*)$;

Таблица 2. Параметры некоторых типов ЗД.

| Тип ЗД | σ , arcsec | τ , с | F , см | d , мкм | M | D , см | 2ω , град. | Ω , кв. град. | SNR | m_{lim} | n_* | $\langle n \rangle$ |
|---------------------|----------------------|---------------|-------------|--------------|------|-------------|----------------------|-------------------------|-----|------------------|-------|---------------------|
| “Классический” (ПЗ) | 4 | 1 | 2 | 24 | 128 | 0.93 | 8.8 | 77 | 15 | 6.7 | 10 | 15 |
| “Классический” (ОЗ) | 4 | 1 | 1 | 24 | 128 | 0.43 | 17.6 | 310 | 23 | 5.7 | 16 | 34 |
| “Современный” (ПЗ) | 1 | 0.1 | 4 | 16 | 512 | 1.88 | 11.7 | 137 | 15 | 6.5 | 16 | 36 |
| “Современный” (ОЗ) | 1 | 0.1 | 4 | 12 | 512 | 1.22 | 8.8 | 77 | 11 | 7.1 | 16 | 39 |
| Высокоточный | 0.1 | 0.1 | 50 | 12 | 1024 | 6.7 | 1.4 | 2 | 11 | 11.1 | 11 | 53 |
| Быстрый | 1 | 0.01 | 8 | 16 | 512 | 3.6 | 5.9 | 35 | 8 | 7.8 | 14 | 44 |
| Сверхточный | 0.01 | 1 | 50 | 12 | 2048 | 7.2 | 2.8 | 7.8 | 90 | 9.7 | 16 | 63 |
| Миллисекундный | 0.001 | 1 | 200 | 6 | 8192 | 19.4 | 1.4 | 2 | 115 | 11.4 | 16 | 72 |
| Нано-ЗД (ПЗ) | 15 | 0.1 | 2 | 20 | 256 | 0.98 | 14.7 | 216 | 7 | 4.8 | 3 | 9 |

ПЗ означает использование матриц прямой засветки с размером изображения звезды $k = 5$, ОЗ — матрица с обратной засветкой ($k = 2$). Во всех строках без пометок предполагается использование матриц с обратной засветкой.

б) если $D(n_*)$ монотонно растет, оптимальной парой будет $n_* = 2$ и $D(2)$;

с) при монотонном убывании $D(n_*)$ вплоть до n_{max} , берем $n_* = n_{\text{max}}$ и $D(n_{\text{max}})$.

11. На основе параметров, соответствующих оптимальным значениям n_* и D , рассчитаем все остальные характеристики ЗД.

12. Для найденных характеристик ЗД проверяем дополнительные условия, перечисленные в Разделе 5. Если какое-либо из условий нарушается — вариант конструкции отбрасываем.

Результаты выполнения перечисленных действий поместим в таблицу вариантов конструкций ЗД, для каждого из которых достигаются заданные начальные параметры: ошибка ориентации σ' и длительность экспозиции τ .

Выбор окончательного варианта из полученной таблицы должен опираться на дополнительные критерии, такие как доступность и цена приемников излучения, дополнительные требования к конструкции ЗД и т.д.

Описанный в этом разделе алгоритм является усовершенствованным вариантом алгоритма, предложенного в работе [16]. В старом варианте алгоритма отсутствовал выбор оптимальных значений n_* и D из зависимости $D(n_*)$; в нём величина D считалась независимой и наряду с параметрами d , M и F включалась в цикл перебора.

7. ВОЗМОЖНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗД ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

В Таблице 2 приведены результаты расчёта параметров ЗД различного назначения. Расчёт проводился по методике, описанной в Разделе 4.

“Классические” датчики по своим характеристикам соответствуют моделям, выпускаемым последние десятилетия, например, приборы БОКЗ-М (ИКИ РАН) [17], 345К (Геофизика-Космос) [18], SED-26 (Sodern, Франция) [19]. “Современные” соответствуют более точным моделям, выпуск которых начат в последние годы, например, БОКЗ-МФ (ИКИ РАН) [20]. Характеристики нано-ЗД близки к параметрам малогабаритного датчика S3S, выпускаемого фирмой Sinclair Interplanetary (Канада) [21], или ST-200, разработанного фирмой Berlin Space Technologies (Германия) [22]. Среди рассчитанных ЗД присутствуют модели на фотоприемниках как с прямой, так и с обратной засветкой.

Лабораторный образец высокоточного ЗД был разработан в ГАИШ МГУ в рамках госконтракта № 14.740.11.0153 с Министерством образования и науки РФ. Более подробное описание этого ЗД приведено в статье [23].

Остальные варианты ЗД, приведенные в Таблице 2, демонстрируют возможности дальнейшего развития ЗД в плане повышения точности и частоты опроса.

8. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ЗД

Погрешность современных выпускаемых промышленностью ЗД намного превышает минимальный уровень погрешности, описанный в Разделах 4 и 5. Такая ситуация вызывается неучетом или недостаточным учетом систематических ошибок. Неучтенные систематические ошибки складываются со случайными ошибками и во много раз увеличивают погрешность определения ориентации. Сравнение реальной и теоретически достижимой погрешностей определения ориентации на примерах ЗД 348К, разработанного ОАО “НПП ‘Геофизика-космос’” и АД-1, разработанного ФГУП “МОКБ ‘Марс’”, приведено в Таблице 3.

К сожалению, для ЗД 348К отсутствуют опубликованные характеристики, поэтому в Таблице 3 приведены данные из частного сообщения [24]. Из него взяты данные касающиеся объектива и режима работы ЗД 348К, а также то, что фотоприемником в этом ЗД является матрица КМОП STAR1000, производства Cypress Semiconductor Corporation (США). Данные об этой матрице взяты из официальных публикаций производителя [25]. Данные по ЗД МОКБ “Марс” взяты с официального сайта [26] и из публикации [27].

Далее в этом Разделе рассматриваются некоторые источники систематических погрешностей и возможные пути их устранения.

8.1. Оптические aberrации объектива

Аберрация оптической системы — это искажение изображения, построенное оптической системой, вызываемое отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе. Аберрацию характеризуют различного вида нарушения гомоцентричности¹² в структуре пучков лучей, выходящих из оптической системы.

Аберрации можно разделить на геометрические, то есть не зависящие от длины волны излучения, и хроматические. Большинство аберраций степенным образом зависят от угла поля (угла между направлением на звезду и оптической осью объектива), а также от светосилы и других параметров оптической системы. Теория аберраций оптических систем хорошо разработана [28].

В ЗД аберрации объектива приводят к смещению фотоцентров изображений звёзд и к искажению формы их изображений. В большинстве случаев для коррекции систематической погрешности

достаточно учесть аберрации до третьего порядка включительно. По данным лабораторных калибровок строятся двумерные полиномы аберраций третьего порядка, описывающие поправки положений центров точечных источников в поле зрения ЗД. Каждый такой полином содержит 10 коэффициентов, которые запоминаются в памяти ЗД.

Для учета хроматических аберраций и температурной зависимости аберраций строятся системы подобных полиномов. Температурная зависимость аберраций может быть исключена термостабилизацией объектива ЗД или использованием нерастраиваемых оптических систем (см. [29, 30]).

Хроматические аберрации велики в линзовых системах, в зеркальных они почти отсутствуют. ЗД принимают излучение в широкой панхроматической полосе. Для такой полосы можно построить эффективный аберрационный полином. Возможно также использовать разные аберрационные полиномы для звёзд различных спектральных классов, в этом случае бортовой каталог должен содержать сведения о показателях цвета или спектральной классификации звёзд.

8.2. Неоднородность чувствительности матричного приемника излучения

Фоточувствительность матричных приемников излучения¹³ меняется от точки к точке. Это вызывается различными причинами, в первую очередь технологическими. Следует различать разброс средней фоточувствительности пикселей и изменение фоточувствительности внутри пикселя.

Минимальной неоднородностью фоточувствительности обладают ПЗС-матрицы с обратной засветкой. У таких ПЗС фоточувствительной является практически вся поверхность пикселя.¹⁴ У ПЗС-матриц с обратной засветкой управляющие электроды расположены на задней стороне утонченной кремниевой пластины, а фоточувствительная передняя сторона матрицы является ровной. Поэтому неоднородности фоточувствительности элементов у приборов такого типа невелики. Так, у ПЗС-матриц с обратной засветкой, предназначенных для астрономических целей, она составляет 1–3% (см., например, [31]).

¹³Под фоточувствительностью здесь подразумевается *сквозная чувствительность тракта*, представляющая собой произведение квантового выхода в пикселе на коэффициенты усиления выходных усилителей (в ПЗС их может быть несколько, в КМОП они устанавливаются в каждом пикселе) и на коэффициент преобразования в АЦП (которых также может быть несколько).

¹⁴За исключением узких областей, разделяющих столбцы элементов матрицы.

¹²Гомоцентрическим называется пучок световых лучей, выпускаемых светящейся точкой или сходящихся в одной точке.

Таблица 3. Параметры ЗД 348К и АД-1 и сравнение их реальной и теоретически достижимой погрешностей определения ориентации

| Параметр | 348К (Геофизика-Космос) | АД-1 (МОКБ Марс) | | |
|---|----------------------------|---------------------|------------|---------------|
| Объектив | | | | |
| Фокусное расстояние | 45 мм | 51.8 мм | | |
| Диаметр входного зрачка | 21 мм | 28.8 мм | | |
| Исправленное поле зрения (2ω) | 20° | 18° | | |
| Полоса пропускания объектива | 450–1100 нм | 400–1100 нм | | |
| Размер изображения звезды | 30 мкм | 70 ± 10 мкм | | |
| Фотоприемник | | | | |
| Тип фотоприемника | КМОП | ПЗС | | |
| Производитель | Сургус | Каскад-1А | | |
| Геометрия | 1024 × 1024 пиксела | 512 × 512 пикселей | | |
| Размер пиксела | 15 × 15 мкм | 23 × 23 мкм | | |
| Рабочая температура | от –40 до +85°С | от –50 до +50°С | | |
| Средняя квантовая эффективность | 20% | 20%* | | |
| Полоса чувствительности | 400–1000 нм | 400–1000 нм* | | |
| Шум считывания пиксела (e^-) | 35 | 40* | | |
| Темновой сигнал (при $T = 293$ К) ($e^-/с$) | 3135 | 3000* | | |
| Режим работы | | | | |
| Длительность экспозиции | 0.2 с | 0.5 с** | | |
| Бортовой каталог звёзд | | | | |
| Предельная величина | 5.2 | 5.0–6.0 | | |
| Число звёзд в каталоге | 1420 | – | | |
| Число обрабатываемых звёзд | 16 | 15 | | |
| Погрешность определения ориентации | | | | |
| Полная погрешность (1σ) | паспортная | теор. достиж. | паспортная | теор. достиж. |
| | 4" | 0"8 | 15" | 0"4*** |

Notes: * Официально опубликованных данных нет, приведены оценки.

** В ЗД АД-1 используется сложное двукратное считывание кадра, указана максимально возможная длительность экспозиции.

*** В ЗД АД-1 используется ПЗС с прямой засветкой, из-за чего теоретическая точность определения ориентации не может быть достигнута.

В ЗД с ПЗС обычно используются более простые в изготовлении и более дешевые ПЗС-матрицы с прямой засветкой. В них излучение перед попаданием на фоточувствительную поверхность проходит сквозь полупрозрачные управляющие электроды. Число электродов над различными точками пиксела может изменяться от 0 до 2. Из-за этого фоточувствительность матриц с прямой засветкой ниже, а внутриспиксельная фоточувствительность меняется в несколько раз.

Со светочувствительными КМОП-матрицами, которые сегодня становятся основным типом приемников излучения в ЗД, ситуация несколько иная. В каждом пикселе помимо фоточувствительного элемента (фототранзистора или фотодиода) содержится несколько управляющих транзисторов, нечувствительных к излучению. Помимо этого, часть поверхности занята непрозрачными или полупрозрачными электродами. Доля чувствительной к свету поверхности пиксела меняется от 30–40% для КМОП с мелкими пикселями¹⁵ до 80–90% и более при крупных пикселях. При этом форма фоточувствительной области пиксела может быть весьма сложной.

Технология изготовления КМОП-матриц с обратной засветкой появилась только в последние несколько лет. Из-за этого сегодня в подавляющем большинстве ЗД с КМОП-сенсорами используются устройства с прямой засветкой. Для создания транзисторов, шин и т.д. число слоев, наносимых на КМОП устройство, в несколько раз больше, чем у ПЗС.¹⁶

Разброс средней фоточувствительности пикселей учитывается с помощью процедуры приведения к плоскому полю. Для этого с помощью ЗД создается изображение равномерно освещенной поверхности, а отсчеты в пикселях реальных кадров делятся на нормированный сигнал плоского поля [32]. Следует заметить, что в современных фотоприемниках разброс чувствительности не превышает нескольких процентов, т.е. много меньше, чем разброс темновых токов.

Наилучшими характеристиками для определения положений фотоцентров изображений звезд обладают ПЗС-матрицы с обратной засветкой. Фоточувствительность этих приборов почти не меняется в пределах пикселей. На них можно создавать изображения звезд диаметром в 1.5–2 пиксела, оптимальные для определения координат в присутствии шумов [6]. Учет неоднородности внутриспиксельной фоточувствительности ПЗС и КМОП

с прямой засветкой требует принятия специальных мер. Наиболее простым способом является увеличение числа пикселей, охватываемых изображением звезды, т.е. увеличение диаметра изображения звезды. При этом происходит рост шумов в изображениях звезд, и улучшение ситуации происходит лишь для ярких объектов.

Другой возможный способ устранения систематической погрешности в матрицах с переменной внутриспиксельной чувствительностью — явный учет профиля этой чувствительности. Для этого требуется предварительное измерение профиля внутриспиксельной фоточувствительности и функции рассеяния точечного источника. С помощью этих данных проводится расчет поправок к положениям фотоцентров на матрице. Такой способ учета неоднородности чувствительности пока практически не исследован и не используется при изготовлении ЗД.

8.3. Неоднородность темнового тока матричного приемника излучения

Темновым током называют электрический ток, который детектируется в пикселе даже при отсутствии освещения. Причиной появления темнового тока является генерация электронов в полупроводнике из-за тепловых процессов. Шум темнового сигнала — один из существенных шумов в ПЗС или КМОП.

Средний уровень темнового тока зависит от температуры, а также меняется от пиксела к пикселу. Температурная зависимость темнового тока близка к экспоненциальной: величина тока меняется примерно в два раза при изменении температуры на 5°. Поэтому основной способ снижения темнового тока — охлаждение приемников излучения.

Изменение темнового тока от пиксела к пикселу связано с дефектами кристаллической структуры приемников излучения. Распределение величин темновых токов в пикселях имеет две особенности. Первая — это значительная ширина распределения, среднеквадратичное отклонение разброса темнового тока сравнимо с его средним значением по матрице. Другая особенность — наличие большого числа пикселей, в которых темновые токи в десятки и сотни раз превышают средние уровни тока в матрице. Такие пиксели называют “горячими” или “белыми.” Еще одна особенность, проявляющаяся в первую очередь у ПЗС-матриц, — существенное (на 2–3 порядка величины) увеличение темнового тока в присутствии электрических полей внутри полупроводника.

Число термоэлектронов, накопленных в пикселе с изображением, зависит от среднего уровня темнового тока и времени экспозиции. Это число

¹⁵ 1.5–3 мкм.

¹⁶ Следует заметить, что над фоточувствительной частью пиксела оптические свойства этих слоев в КМОП более однородны, чем у ПЗС, несмотря на их большее число.

является случайной величиной, описываемой распределением Пуассона.

Уровни учета неоднородности темнового тока в современных ЗД существенно различаются: от полного игнорирования различия этих токов, до учета среднего уровня тока на матрице, или учета среднего уровня темнового тока с отдельной обработкой “горячих” пикселей. Ни в одном из ЗД сегодня не учитываются различия темновых токов “нормальных” пикселей.

Следует заметить, что указанных уровней учета темнового тока оказывается явно недостаточно для достижения максимальной точности определения ориентации. Неоднородность темновых шумов для типичных ЗД без охлаждения фотоприемника¹⁷ приводит к увеличению погрешности определения ориентации минимум в 2–3 раза [33]. Отметим также, что средние уровни темнового тока в пикселях изменяются под воздействием ионизирующей радиации.

Наиболее правильной и, одновременно, наиболее сложной методикой учета темновых токов является построение их попиксельной карты. Для этого требуется проведение специальных калибровочных процедур в лабораторных условиях и, возможно, их повторение в полете.¹⁸ Заметим, что в КМОП-матрицах нет переноса заряда, поэтому темновой сигнал создается только темновым током считываемого пикселя, т.е. карты темновых токов используются в исходном виде. В ПЗС-матрице процедура считывания более сложна: накопленные пакеты фотоэлектронов переносятся вдоль столбцов в считывающий регистр, и уже только из него считываются¹⁹ [8]. Из-за этого в темновой сигнал пикселя вносят вклад темновые токи многих элементов ПЗС, что требует весьма сложного использования исходной карты темновых токов, получаемой при калибровке (подробнее см. [33]).

8.4. Геометрические неоднородности матричного приемника излучения

На изображениях, полученных с помощью электронного микроскопа, легко увидеть, что геометрическая структура ПЗС и КМОП-матриц несовершенна, размеры пикселей и их расположение отклоняется от идеальной прямоугольной сетки (иногда до нескольких процентов). При измерениях положений центров изображений звёзд с погрешностью до 0.1 пикселя эти искажения

несущественны, однако при более высоких точностях они сказываются на результатах измерений.

Процедура геометрической калибровки ПЗС-матриц была разработана в ходе выполнения ныне прекращенного проекта космического астрометрического интерферометра SIM (SIM-light) [34]. Подробное описание этой процедуры приведено в работах, посвященных проекту NEAT [35]. Процедура сводится к измерению с помощью калибруемой ПЗС-матрицы серии интерференционных картин с известными ширинами и ориентациями интерференционных полос. Обработка полученных кадров позволяет определить реальные геометрические характеристики каждого из пикселей матрицы. Полученные данные используются при определении положений центров изображений звёзд.

Проведение подобной калибровочной процедуры сегодня возможно только в лабораторных, т.е. предполетных условиях. Проведение летных калибровок геометрии матричных фотоприемников пока кажется затруднительным или даже практически невозможным.

8.5. Ошибки координат звёзд в бортовом каталоге

В современных астрономических каталогах зафиксированы звёзды на всем небе или значительной его части до 20^m-25^m в различных полосах видимого или ближнего инфракрасного диапазонов. Однако точность, с которой известны координаты этих звёзд, существенно различается.

Наиболее точные координаты звёзд были получены в 1989–1993 гг. в ходе космического эксперимента Hipparcos [36]. На основе данных этого эксперимента был создан астрометрический каталог Hipparcos [3] и серия каталогов Tycho [3–5]. Каталог Hipparcos содержит 118 000 звёзд до 9^m с погрешностью координат для звёзд ярче 7^m порядка $0''.001$. В последнем из каталогов Tycho [5] содержится около 2.5 млн звёзд примерно до $11^m.5$ с погрешностью координат порядка $0''.005-0''.015$. Эти высокоточные каталоги содержат только небольшое число самых ярких звёзд.

Следующими по точности являются массовые наземные каталоги, полученные с использованием матричных фотоэлектрических приемников излучения. К ним относятся каталоги 2MASS [37], SDSS [38] и ряд других. Каталог 2MASS содержит 470 млн звёзд в трех полосах: *J*, *H* и *K* ближнего инфракрасного диапазона. Каталог охватывает всю небесную сферу и полон до $15^m.7$ в полосе *J*. Каталог SDSS содержит измерения 260 млн звёзд в пяти фотометрических полосах: *u*, *g*, *r*, *i*, *z*. В самой глубокой полосе *r* его предельная величина обнаружения составляет $22^m.5$. Седьмая версия SDSS охватывает $14\,500 \square^\circ$ небесной сферы (т.е.

¹⁷Т.е. при комнатной температуре кристалла.

¹⁸Последнее нужно для учета изменения уровня темновых токов из-за воздействия заряженных частиц.

¹⁹В ПЗС с переносом кадра, которые широко используются в ЗД, процедура чтения еще более сложна.

35% ее поверхности). Другие каталоги этой группы имеют существенно меньшие объемы. Астрометрическая погрешность наземных астрометрических каталогов составляет $0''03-0''15$.

Данные о координатах остальных звёзд получены путем сканирования и оцифровки фотографических пластинок Паломарских обзоров неба [39–41]. Таким способом были созданы каталоги USNO-A2.0 и USNO-B1.0 [42, 43], которые содержат примерно 500 млн и 1 млрд объектов соответственно. Фотографические звёздные величины в USNO-A2.0 приведены в двух (синей и красной), а в USNO-B1.0 — в пяти спектральных полосах (две синих, две красных и одна ближняя инфракрасная). Астрометрическая точность этих каталогов невысока. В пределах одной фотопластинки случайные ошибки составляют в среднем $0''1$. Гораздо большие систематические ошибки существуют между координатами звёзд на разных пластинках: они могут достигать $0''3-0''5$, но именно они определяют погрешность каталогов в целом.

Координаты большинства звёзд, входящих в современные каталоги, известны с точностью не хуже $0''1-0''2$. При этом чем более слабые звёзды содержит каталог и чем больше его объем, тем больше погрешность координат входящих в него звёзд.

Современные ЗД (соответствующие вариантам “классический” и “современный” из Таблицы 2) используют звезды до 5^m-7^m , координаты которых известны с погрешностью в сотни раз меньшей, чем погрешность этих датчиков.

“Высокоточный” ЗД из Таблицы 2 определяет ориентацию с погрешностью $0''1$ для звёзд до 11^m-12^m . Большинство этих звёзд входят в каталог Tycho-2, т.е. погрешность их координат в несколько раз меньше погрешности этого ЗД.

Однако при попытке создать еще более точный ЗД, например, “сверхвысокоточный” или “миллисекундный” из Таблицы 2, мы столкнемся с ситуацией, в которой погрешность координат звёзд, попадающих в поле зрения ЗД, будет существенно превышать требуемую точность определения ориентации. Разрешить эту ситуацию можно только одним способом — путем создания астрометрических каталогов для слабых звёзд более точных, чем существующие. Ближайшей возможностью создать подобные каталоги является космический астрометрический эксперимент Gaia [44], начало которого планируется в конце 2013 г. В ходе этого эксперимента будет произведен обзор всей небесной сферы, координаты звёзд ярче 12^m будут определены с погрешностью не хуже $10 \mu\text{as}$, а звёзд 17^m — с погрешностью $100-300 \mu\text{as}$. Следует, однако, заметить, что новый астрометрический

каталог следует ожидать в лучшем случае через пять лет, а скорее всего, через десять лет после завершения стадии наблюдений эксперимента.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе рассмотрены принципы расчета конструктивных характеристик ЗД, необходимых для достижения заданного уровня точности определения ориентации и быстродействия датчика. Показано, что существуют много возможностей для улучшения упомянутых параметров. Например, при опросе ЗД с частотой 1 Гц (т.е. при длительности экспозиции не превышающей 1 с) погрешность датчика может быть уменьшена до $0''01$ при габаритах близких к современным промышленным образцам.

Применение предложенного алгоритма расчета к существующим ЗД позволяет определить их оптимальную точность, которая обычно оказывается в 10–30 раз лучше реально достигнутой, что говорит о недостаточном учете систематических ошибок в этих приборах и о большом потенциале их модернизации.

При установке высокоточного ЗД на космический аппарат возникает проблема связи его ориентации с ориентацией целевой аппаратуры: телескопов, камер, антенн, лазерных передатчиков и т.п. При погрешностях в $5''-15''$ для этого хватало конструкционной жесткости космического аппарата; при секундных и тем более при субсекундных точностях этого становится совершенно недостаточно. Взаимную ориентацию ЗД и целевого прибора необходимо измерять в реальном времени с погрешностями не хуже, чем погрешности ЗД. Появляется необходимость создания на таком космическом аппарата внутренней контрольно-измерительной (метрологической) системы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научные исследования, послужившие основой этой статьи, проведены при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки России: соглашения № 8059, 8239, 8758.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. И. Федосеев, М. П. Колосов, *Опτικο-электронные приборы навигации и ориентации космических аппаратов* (Логос, Москва, 2007).
2. В. В. Цисарж, Р. И. Марусик, *Математические методы компьютерной графики* (Факт, Киев, 2004).
3. ESA, 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200.

4. E. Høg, C. Fabricius, V. V. Makarov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **355**, L27 (2000).
5. F. van Leeuwen, *Astronom. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
6. А. И. Захаров, М. Г. Никифоров, *Механика, управление и информатика* **2**, 280 (2011).
7. В. Б. Берзин, В. В. Берзин, А. К. Цыцулин, А. В. Соколов, *Известия вузов России. Радиоэлектроника* **4**, 36 (2004).
8. S. V. Howell, *Handbook of CCD Astronomy* (Cambridge University Press, Cambridge, 2006).
9. N. Pogson, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **17**, 12 (1856).
10. Э. В. Кононович, В. И. Мороз, *Общий курс астрономии* (Едиториал УРСС, Москва, 2004).
11. E2v CCD230-84 Scientific CCD Sensor, www.e2v.com/e2v/assets/File/documents/imaging-space-and-scientific-sensors/ccd230-84-bi-mo.pdf
12. В. Г. Мошкалев, А. В. Бирюков, А. И. Захаров и др., *Механика, управление и информатика* **8**, 361 (2013).
13. I. S. Kruzhilov, *Journal of Applied Remote Sensing* **6** (01), 063537 (2012).
14. M. Born and E. Wolf, *Principles of optics* (Pergamon press, 1964; Nauka, Moscow, 1973).
15. Г. Г. Слюсарев, *О возможном и невозможном в оптике* (Изд. АН СССР, Москва, Ленинград, 1944).
16. А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, М. С. Тучин, в *Инновационные решения для космической механики, физики, астрофизики, биологии и медицины*, Ред. В. А. Садовничий, А. И. Григорьев, М. И. Панасюк (МГУ, Москва, 2010), с. 43.
17. Г. А. Аванесов, В. А. Красиков, А. В. Никитин, *Механика, управление и информатика* **1**, 387 (2009).
18. С. А. Дятлов, Р. В. Бессонов, *Механика, управление и информатика* **1**, 11 (2009).
19. J. Mínes-Dubé, P. Jacob, D. Guillon, and D. Temperanza, in *6-th Int. ESA Conf. on Guidance, Navigation and Control Systems*, Ed. by D. Danesy, ESA SP-606 (ESA, 2006), p. 83.1.
20. Р. В. Бессонов, С. А. Дятлов, А. Н. Куркина и др., *Механика, управление и информатика* **1**, 32 (2009).
21. J. Enright, D. Sinclair, and K. C. Fernando, in *25-th Annual AIAA/USU Conf. on Small Satellites*, paper SSC11-X-1 (Logan, Utah, 2011).
22. T. Segert, S. Engelen, M. Buhl, and B. Monna, in *25-th Annual AIAA/USU Conf. on Small Satellites*, paper SSC11-IX-4 (Logan, Utah, 2011).
23. О. Ю. Стекольников, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, *Механика, управление и информатика* **8**, 231 (2013).
24. А. М. Щекин (частное сообщение).
25. Cypress Semiconductor Corporation, STAR-1000, 1 M Pixel Radiation-Hard CMOS image sensor, <http://www.datasheetarchive.com/STAR1000-datasheet.html>
26. Официальный сайт МОКБ “МАРС,” Астродатчик АД-1, <http://www.mars-mokb.ru/pic/ad.jpg>
27. А. Г. Бровкин, Б. Г. Бурдыгов, С. В. Гордийко и др., *Бортовые системы управления космическими аппаратами. Учебное пособие*, Ред. А. С. Сыров (МАИ-Принт, Москва, 2010).
28. Н. Н. Михельсон, *Оптические телескопы. Теория и конструкция*, (Наука, Москва, 1976).
29. Д. Д. Максудов, *Астрономическая оптика*, 2-е изд. (Наука, Ленинград, 1979).
30. Н. Н. Михельсон, *Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета* (Физико-математическая литература, Москва, 1995).
31. E2v CCD47-20 AIMO High Performance CCD Sensor, www.e2v.com/e2v/assets/File/documents/imaging-space-and-scientific-sensors/44-47-20.pdf
32. W. Romanishin, *An Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs*, (Univeristy of Oklahoma, Norman, OK, 2006); http://www.physics.csbsju.edu/370/photometry/manuals/OU.edu_CCD_photometry_wrccd06.pdf
33. М. С. Тучин, А. В. Бирюков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, *Механика, управление и информатика* **8**, 370 (2013).
34. C. Zhai, X. An, R. Goullioud, et al., *Proc. of SPIE* **7734**, 77341J (2010).
35. C. Zhai, M. Shao, R. Goullioud, and B. Nemati, *Proc. R. Soc. A* **467**, 3550 (2011).
36. Ж. Ковалевский, *Современная астрометрия*, (Век-2, Фрязино, 2004).
37. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astronom. J.* **131**, 1163 (2006).
38. J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, S. S. Allam, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **172**, 634 (2007).
39. G. O. Abell, *Astron. Soc. of the Pacific Leaflets* **8**, 121 (1959).
40. I. N. Reid, C. Brewer, R. J. Brucato, et al., *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **103**, 661 (1991).
41. R. R. Gal, R. R. de Carvalho, S. C. Odewahn, et al., *Astronom. J.* **128**, 3082 (2004).
42. D. Monet, *USNO-A V2.0, A Catalog of Astrometric Standards* (U.S. Naval Observatory, Flagstaff, AZ, 1998).
43. D. G. Monet, S.E. Levine, B. Casian, et al., *Astronom. J.* **125**, 984 (2003).
44. M. A. C. Perryman, *ASP Conf. Ser.* **338**, 3 (2005).

Minimum Star Tracker Specifications Required to Achieve a Given Attitude Accuracy

A. I. Zakharov, M. E. Prokhorov, M. S. Tuchin, A. O. Zhukov

We describe the principles of the computation of minimum specifications of the optical system and array detector of the star attitude sensor to achieve the required attitude accuracy for the given exposure. The computations assume that the attitude error is influenced only by random noise of diverse origin, whereas all systematic errors have been eliminated. We report the specifications required for trackers meant for different purposes. We show that the errors of existing star trackers exceed the lowest achievable error by one order of magnitude because of unaccounted biases. We discuss the types of these biases and the methods that can be used to take them into account or eliminate them.

Keywords: *space vehicles—instrumentation: detectors—techniques: image processing*