

# УЧЁТ ТЕРМОГЕНЕРАЦИИ МАТРИЧНЫХ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ КАК ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА

*М. С. Тучин, А. В. Бирюков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров*

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга  
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова  
(ГАИШ МГУ), Москва

Обсуждаются эффективные алгоритмы расчёта темнового тока при проведении первичной обработки изображения в реальном времени для типичных режимов функционирования звёздного датчика.

*Ключевые слова:* звёздный датчик, темновой ток, ПЗС.

## ВВЕДЕНИЕ

Опубликованные параметры звёздных датчиков (ЗД) различных производителей (см., например, [Дятлов, Бессонов, 2009]) позволяют сделать вывод, что погрешность ориентации современных датчиков составляет  $1/2 \dots 1/4$  углового размера элемента соответствующего прибора.

В статье рассматривается способ снижения погрешности определения ориентации путём повышения точности вычисления положения фотоцентра изображения звезды на приёмнике излучения — матричном приборе с зарядовой связью (ПЗС). Положение фотоцентра вычисляется как взвешенная сумма координат пикселей кадра, занятых изображением звезды. При оптимальном размере изображения (1,5...2 пиксела для ПЗС с обратной засветкой) случайную составляющую этой погрешности можно сделать очень малой [Захаров, Никифоров, 2011].

Везде далее будем отличать термин «пиксел», относящийся к ячейке кадра, от термина «элемент», относящегося к ячейке матричного ПЗС. Необходимость этого связана с тем, что ячейки кадра перемещаются в ходе считывания и экспозиции в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) относительно элементов ПЗС.

Погрешность определения ориентации в звёздных датчиках имеет следующие составляющие:

- погрешности определения координат фотоцентров изображений звёзд;
- погрешности метода определения параметров ориентации по совокупности координат звёзд и координат фотоцентров;
- погрешности вычисления координат звёзд каталога.

Одним из способов снижения погрешности определения координат фотоцентров является учёт геометрического шума — неоднородности характеристик элементов матричного приёмника излучения. Этот способ не требует никаких переделок механической или оптической частей приборов, но предполагает

---

**Тучин Максим Сергеевич** — младший научный сотрудник, e-mail: wizard81@mail.ru.

**Бирюков Антон Владимирович** — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: eman@sai.msu.ru.

**Захаров Андрей Игоревич** — научный сотрудник, e-mail: zakh@sai.msu.ru.

**Прохоров Михаил Евгеньевич** — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, доцент, e-mail: mike.prokhorov@gmail.com.

использовать более сложные алгоритмы обработки изображения. Подобные алгоритмы давно являются стандартом в астрономии при проведении астрометрических и фотометрических измерений [Howell, 2006], однако в датчиках ориентации они, как правило, не используются.

Стандартный алгоритм астрономической коррекции состоит, как правило, из следующих действий: 1) вычитание байеса (смещения); 2) вычитание сигнала в пикселе, образованного вследствие термогенерации (темнового сигнала) и 3) учёт неоднородности чувствительности элементов матричных ПЗС. Байес обычно не меняется от строки к строке и, следовательно, к геометрическим шумам не относится. Неоднородность чувствительности — первая составляющая геометрического шума — определяется путём построения «плоского поля» — изображения однородной излучающей поверхности. Эта характеристика применима только для светочувствительной части приёмника излучения, которая, например, для ПЗС с переносом кадра, охватывает менее половины элементов матричного ПЗС. Типичное изменение чувствительности от элемента к элементу составляет 3...5 % для ПЗС с обратной засветкой и 1...3 % для ПЗС с прямой засветкой и КМОП [e2v, 2003]. Опыт показывает, что и байес, и неоднородность чувствительности мало меняются со временем и с температурой.

Наиболее сложным является учёт темнового сигнала. Во-первых, темпы термогенерации сильно зависят от температуры. Во-вторых, разброс средних значений темпов термогенерации в отдельных элементах во много раз превышает случайный разброс (шум) в каждом из них. В-третьих, помимо «нормальных» элементов в ПЗС существуют «горячие», в которых темпы термогенерации от десятков до сотен раз превосходят значения в «нормальных» элементах и могут иметь другую зависимость от температуры [Smith et al., 2004].

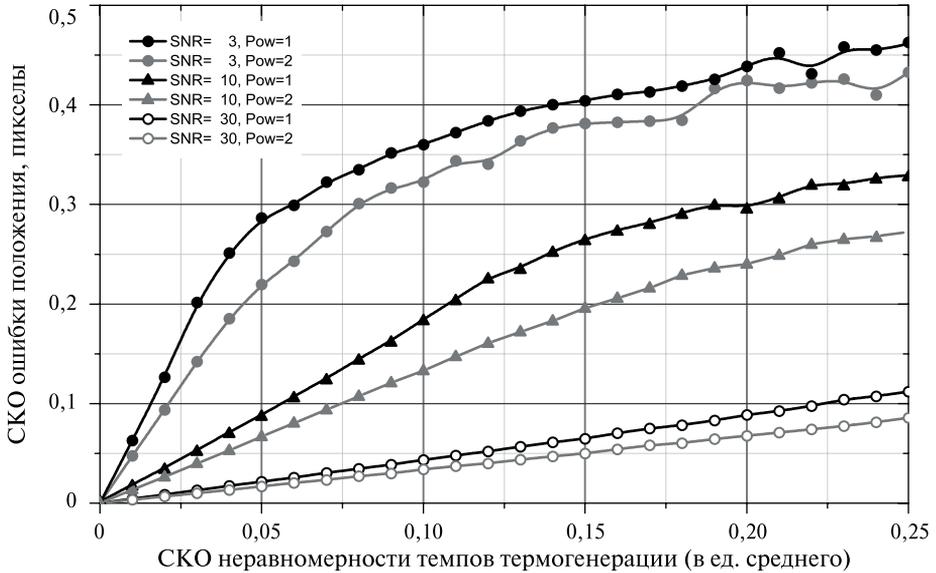
## ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕМПОВ ТЕРМОГЕНЕРАЦИИ НА ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ

Для определения влияния неравномерности темпов термогенерации элементов ПЗС было проведено тестирование процедуры определения координат фотоцентров на модельных изображениях с неравномерной термогенерацией. Генерировались кадры с уровнем термогенерации 250 электронов на элемент и различными уровнями неравномерности термогенерации от 0 до 60 электронов на элемент. В процедуре определения координат темновой сигнал определялся по участку кадра, не занятого изображением звезды (по периметру квадрата, содержащего изображение). По нескольким тысячам кадров вычислялось СКО положения фотоцентра.

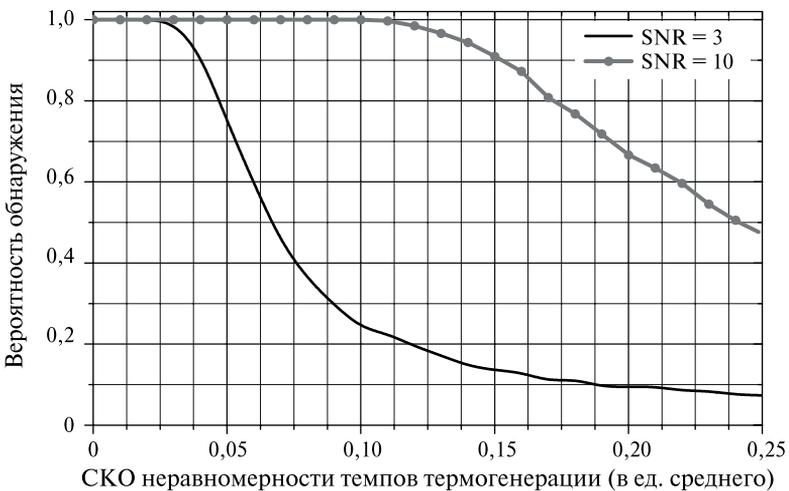
На рис. 1 показана зависимость ошибки определения координат фотоцентра от СКО неравномерности темпов термогенерации, выраженных в единицах среднего значения. Кривые приведены для трёх уровней сигнала, которые при нулевой неравномерности темпов термогенерации дают указанное отношение сигнала к шуму (SNR) без учёта шума чтения. Приведены два варианта формулы (линейная и квадратичная) определения координат фотоцентра.

При низких уровнях сигнала ( $SNR = 3$ ) и больших значениях СКО неравномерности темпов термогенерации кривые отличаются от прямых. Это объясняется тем, что для заданного уровня сигнала и при больших значениях

СКО неравномерности темпов термогенерации звезды увеличивается вероятность, что звезда не будет обнаружена при выбранном критерии обнаружения (критерий превышения сигнала над шумом  $SNR_{eff}$  был выбран равным 3, включая шум неравномерности темпов термогенерации). На рис. 2 представлены кривые вероятности обнаружения изображений звёзд для сигналов с  $SNR$ , равным 3 и 10 (в отсутствие неравномерности темпов термогенерации).



**Рис. 1.** Зависимость СКО ошибки положения фотоцентра от СКО неравномерности темпов термогенерации, выраженных в единицах среднего значения. Приведены для трёх уровней сигнала, характеризуемых параметром  $SNR$ , и для двух вариантов формулы ( $Pow = 1$  и  $Pow = 2$ ) для определения координат фотоцентра



**Рис. 2.** Вероятность обнаружения изображения звезды в зависимости от СКО неравномерности темпов термогенерации, выраженного в единицах среднего значения. Кривые приведены для двух уровней сигнала, характеризуемых параметром  $SNR$

Таким образом,  $SNR_{eff}$  на графиках уменьшаются до 0,9 для  $SNR = 3$  и примерно до 3,0 для  $SNR = 10$  при СКО неравномерности темпов термогенерации, равном 0,25.

Ошибка положения фотоцентра для сигнала с  $SNR = 10$ , обусловленная только пуассоновским шумом, должна составить величину 0,1 пиксела [Захаров, Никифоров, 2011]. Из графиков на рис. 2 видно, что в случае неравномерности темпов термогенерации, составляющей 25 % от среднего темпа термогенерации, ошибка определения положения фотоцентра составит около 0,3, что в 3 раза хуже случая, когда имеется только пуассоновский шум.

## ОХЛАЖДЕНИЕ МАТРИЧНОГО ПРИБОРА С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Одним из способов решения проблемы является охлаждение матричного ПЗС до температур, когда термогенерацией можно пренебречь (за исключением, возможно, термогенерации отдельных «горячих» элементов). Согласно данным для прибора e2v CCD 47-20 VI AIMO (используемого нами при разработке высокоточного звёздного датчика) достаточно охладить кристалл до температуры  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , чтобы уменьшить термогенерацию до уровня 1 термоэлектрона за секунду (0,1 электрона за время экспозиции 100 мс).

Но охлаждение ПЗС налагает дополнительные требования к датчику и к платформе, на которой он установлен. Для обеспечения температурного режима датчика потребуется установка термоэлектрического холодильника и обеспечение его питанием, установка радиатора и защита радиатора от излучения Солнца и Земли (проблема сброса тепла) и т. п.

Кроме того, при низких температурах сильнее проявляется неэффективность переноса заряда, связанная с захватом части заряда электронными ловушками в кристалле кремния. Пример действия подобной ловушки можно увидеть на рис. 3.



**Рис. 3.** Часть темного кадра ПЗС с отчётливыми следами действия ловушек. Особенно ярко выделяется эмиссионный след ловушки, на которую попал сигнал от «горячего» элемента

При низких температурах характерное время испускания электронов ловушками значительно больше характерного времени переноса заряда в ПЗС [Cawley et al., 2001]. Этот эффект, а также отсутствие фона, который мог бы заполнять ловушки, приводит к тому, что изображения звёзд смазывается при проходе через ловушку, что негативно отражается на точности определения координат фотоцентров изображений звёзд.

## АЛГОРИТМ УЧЁТА ТЕРМОГЕНЕРАЦИИ

Расчёт темнового заряда, накопленного в пикселе, осложняется тем, что в звёздных датчиках, как правило, применяются матричные ПЗС с переносом кадра. В таких приборах существуют две независимо управляемые секции. В одной из них — светочувствительной секции накопления — осуществляется экспозиция, после чего изображение быстро переносится в защищённую от света секцию хранения, из которой производится его построчное считывание. Такая конструкция позволяет вести считывание и обработку одного кадра одновременно с экспозицией следующего. В секции накопления изображение не меняет своего положения относительно элементов ПЗС, а в секции хранения сложным образом перемещается в ходе считывания. Например, при полном считывании кадра первая его строка считывается сразу, а остальные проводят в секции хранения время, пропорциональное её номеру. В процессе считывания строки кадра перемещаются по секции хранения, в результате чего накопленный темновой заряд меняется в зависимости от времени нахождения строки кадра на элементах ПЗС. При неполном считывании кадра определение накопленного темнового заряда становится ещё более сложным. Режим неполного считывания используется для того, чтобы увеличить частоту считывания кадров, и может быть применён, когда есть информация о том, в каких частях кадра находятся звёзды.

Расчёт темнового сигнала осуществляется в два этапа. На первом этапе калибруются темпы термогенерации. Производится съёмка нескольких темновых кадров с различным временем экспозиции. В случае матричного ПЗС с переносом кадра темновые кадры после экспозиции считываются полностью с параллельным переносом в обеих секциях (накопления и хранения). В результате получается кадр с удвоенным числом строк. После обработки всех темновых кадров получаются значения темпов термогенерации в единицах отсчётов на элемент за такт для обеих секций (накопления и хранения).

Обычно в каждой строке матричного ПЗС присутствуют столбцы элементов, закрытых от попадания излучения, назовём их темновыми столбцами. При полном считывании кадра для каждого пиксела кадра вычисляется коэффициент, равный отношению темнового сигнала, накопленного в рассматриваемом пикселе, к темновому сигналу, накопленному в пикселях темновых столбцов той же строки, что и рассматриваемый пиксел. Карта таких коэффициентов запоминается в постоянной памяти. Таким образом находятся относительные темпы термогенерации пикселов в предположении, что относительная температурная карта ПЗС постоянна, а температурная зависимость элементов ПЗС отличается лишь коэффициентом пропорциональности. Если предполагается считывать кадр частично (участки кадра, содержащие изображения звёзд), то также запоминаются сами темпы термогенерации.

Второй этап происходит во время работы датчика. С матричного ПЗС считываются значения сигнала от темновых столбцов в каждой строке и суммируются. В случае считывания полного кадра для каждого пиксела этой же строки кадра вычисляется накопленный заряд, равный произведению суммарного сигнала пикселей темновых столбцов на соответствующий этому пикселу коэффициент, вычисленный на первом этапе. В случае считывания участков кадра подобный коэффициент рассчитывается во время обработки на основе данных о темпах термогенерации и об отношении времени, проведенного пикселом в разных элементах ПЗС. Это невозможно сделать заранее, так как в общем случае нельзя предсказать положение изображений звезд в кадре.

Изложим в общем виде алгоритм расчёта.

Разделим заряд, накопленный в пикселе кадра:

- на заряд, полученный во время экспозиции изображения в области накопления, причём, если во время экспозиции был использован режим временной задержки накопления (ВЗН), необходимо учесть, что строка кадра экспонировалась в нескольких строках области накопления;
- заряд, накопленный во время считывания кадра из области хранения.

Зарядами, накопленными во время переноса строк, можно пренебречь ввиду малости времени переноса строк.

Обозначим:  $t$  — температура ПЗС (средняя или в какой-то характерной точке);  $t_c$  — значение температуры ПЗС, измеренное во время калибровки;  $D_{i,j}(t)$  — темновой сигнал в пикселе кадра, находящемся в строке  $i$ , столбце  $j$ , полученный при температуре ПЗС  $t$ ;  $T_{i,j}$  — темп термогенерации элемента ПЗС, находящегося в строке  $i$ , столбце  $j$  (число электронов на элемент за такт);  $d_{i,j}^{rel}$  — коэффициент, равный отношению суммарного накопленного заряда в пикселе кадра к суммарному накопленному заряду пикселей из темновых столбцов той же строки, верхний индекс  $rel$  обозначает, что это относительная величина;  $T_{i,j}^{img}$  — темп термогенерации элемента ПЗС в области накопления, верхний индекс  $img$  обозначает отношение к области накопления;  $T_{i,j}^{st}$  — темп термогенерации элемента ПЗС в области хранения, верхний индекс  $st$  обозначает отношение к области хранения;  $\tau_{img}$  — продолжительность экспозиции кадра в тактах;  $\tau_{rd}$  — продолжительность считывания строки в тактах;  $\{r_i\}$  — список номеров считываемых строк, упорядоченный по возрастанию (если кадр считывается не целиком);  $\{k\}_{dark}$  — список темновых столбцов;  $D_i^{dark}(t)$  — суммарный заряд всех пикселей темновых столбцов в строке  $i$ , полученный при температуре ПЗС  $t$ ;  $n_{TDI}$  — число строк сдвига во время экспозиции в режиме ВЗН.

На первом этапе определяются коэффициенты  $T_{i,j}$ , а для режима считывания полного кадра вычисляются относительные величины накопленного заряда при калибровочной температуре  $t_c$ :

$$d_{ij}^{rel} = \frac{D_{ij}(t_c)}{\sum_{k_{dark}} D_{i,k_{dark}}(t_c)},$$

где  $D_{i,j}(t_c) = \frac{\tau_{img}}{1 + n_{TDI}} \sum_{k=0}^{n_{TDI}} T_{i+k,j} + \tau_{rd} \sum_{k=1}^i T_{i-k,j}$ .

На втором этапе в случае считывания всего кадра вычисляем заряд для каждого обрабатываемого пиксела при текущей температуре ПЗС  $t$ :

$$D_{i,j}(t) = D_i^{dark}(t) \times d_{ij}^{rel}.$$

При частичном считывании кадра (избранные строки) формула расчёта накопленного темнового заряда имеет следующий вид:

$$D_{r_i,j}(t_c) = \frac{\tau_{img}}{1 + n_{TDI}} \sum_{k=0}^{n_{TDI}} T_{r_i+k,j} + \tau_{rd} \sum_{k=1}^{i-1} T_{r_i-r_k,j},$$

где  $r_i$  —  $i$ -й номер строки в списке считываемых строк.

Расчёты можно производить параллельно с фотометрической редуцией пикселов кадра, но для каждой строки в момент её обработки они должны быть уже вычислены. Поэтому рекомендуется производить расчёт темнового сигнала для следующей считываемой строки во время обработки текущей и записывать результат в буферную память.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование показало, что в звёздных датчиках ориентации неравномерность темпов термогенерации в элементах матричных ПЗС существенно увеличивает погрешность определения координат изображений звёзд. Для решения проблемы необходимо либо охлаждать ПЗС, что приводит к другим проблемам, либо производить более точный учёт темнового сигнала, в том числе учёт его неоднородности.

Предложенный авторами метод учёта темнового сигнала для матричных ПЗС, снабжённых темновыми столбцами, позволяет рассчитывать средний темновой сигнал в пикселах кадров без измерения температуры кристалла ПЗС и в отсутствие термостабилизации. Отметим, что метод работоспособен и в режиме полного чтения кадра, и при частичном его считывании, а также может применяться как на полнокадровых ПЗС, так и на ПЗС с переносом кадра.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Дятлов, Бессонов 2009] Дятлов С. А., Бессонов Р. В. Обзор звёздных датчиков ориентации космических аппаратов // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2009. С. 11–31.
- [Захаров, Никифоров, 2011] Захаров А. И., Никифоров М. Г. Систематические и случайные ошибки определения положения фотоцентров звёзд на матричных фотоприёмниках // 2-я Всерос. научно-техническая конференция «Современ. проблемы ориентации и навигации космич. аппаратов»: Сб. тр. 13–16 сент. 2010 г. Россия, Таруса / Под ред. Г. А. Аванесова. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 280–288.
- [Cawley et al., 2001] Cawley L., Goudfrooij P., Whitmore B., Stiavell M. Cte Working Group. HST CCD Performance in the Second Decade: ChargeTransfer Efficiency // Instrument Science Report WFC3 2001-05, 2001.

- [Howell, 2006] *Howell St.B.* Handbook of CCD Astronomy. Cambridge: University Press, 2006.
- [e2v, 2003] High performance imaging solutions e2v: 2007. URL: <http://www.e2v.com/products-and-services/high-performance-imaging-solutions/imaging-solutions-cmos-ccd-emccd/datasheets/> (01.09.2012).
- [Smith et al., 2004] *Smith D. R., Holland A. D., Hutchinson I. B.* Random telegraph signals in charge coupled devices // Nuclear Instruments and Methods. 2004. V. A530. P. 521–535.

## **ACCOUNTING THERMO GENERATION OF CCD MATRIX AS THE BASIS FOR INCREASING THE ACCURACY OF THE STAR TRACKER**

*M. S. Tuchin, A. V. Biryukov, A. I. Zakharov, M. E. Prokhorov*

Sternberg Astronomical Institute of Lomonosov Moscow State University (SAI MSU), Moscow

The authors discuss efficient algorithms for calculating the dark current during the initial processing of images in real time for typical operating modes of the star tracker.

*Keywords:* star tracker, dark current, CCD.

---

**Tuchin Maksim Sergeevich** — junior scientist researcher, e-mail: wizard81@mail.ru.

**Biryukov Anton Vladimirovich**— scientist researcher, PhD, e-mail: eman@sai.msu.ru.

**Zakharov Andrey Igorevich** — scientist researcher, e-mail: zakh@sai.msu.ru.

**Prokhorov Mikhail Evgenievich**— leading scientist researcher, associated professor, head of laboratory, doctor of physical and mathematical science, e-mail: mike.prokhorov@gmail.com.