

Регистрация звездных прохождений посредством полупроводниковой матрицы в реальном времени

© А.Л. Толстой,^{1,2} С.Д. Петров,¹ С.С. Смирнов,¹ Д.А. Трофимов,¹ С.И. Грачев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия

² Институт прикладной астрономии РАН,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: st063510@student.spbu.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2023 г.

В окончательной редакции 14 сентября 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Рассмотрена проблема использования КМОП-матриц для регистрации прохождений звезд на пассажном инструменте. Проведен проект модернизации пассажного инструмента и текущие результаты работы по отработке технологий для создания модернизированного пассажного инструмента. Рассмотрена проблема специфических для КМОП-матриц артефактов изображений, и предложена методика калибровки снимков, убирающая эти артефакты для наблюдений методом прохождений звезд. Предложенная методика не требует специальных калибровочных снимков, что упрощает работу и делает получение итогового результата быстрее в перспективе в режиме реального времени.

Ключевые слова: калибровка изображений, шум фиксированного распределения.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56832.f252-23

До 80-х годов прошлого века наблюдения на пассажном инструменте являлись основным способом определения Всемирного времени, прямых восхождений звезд, а также долгот пунктов. С 1980-х годов начались регулярные наблюдения на радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой (РСДБ), которые в 1990-е полностью вытеснили наблюдения на пассажных инструментах из широкой астрономической практики. В настоящее время РСДБ является безальтернативным способом определения Всемирного времени и разности Всемирного и Всемирного координированного времени. Подобная ситуация порождает потенциальные проблемы — задачи координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) сейчас решаются в связке двух технологий: РСДБ, которая обеспечивает фундаментальную базу, и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), которые практически полностью захватили прикладные задачи и некоторые задачи фундаментальной науки. Однако до сих пор имеются задачи, в которых оптические наблюдения важны. В области прикладной науки азимут местного предмета из оптических наблюдений получается быстрее и менее трудоемко, чем азимут из обработки ГНСС наблюдений. Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что измерения, проводимые в радиодиапазоне и в оптике, дают несколько различные координаты: в случае радионаблюдений речь идет о геодезической широте и долготе, тогда как оптические наблюдения дают астрономическую широту и долготу, разность между которыми позволяет определить уклонение отвеса, что является самостоятельной важной научной задачей. Определение уклонения отвеса на основе сравнения астрономических и геодезических координат является наиболее быстрым

и дешевым по финансовым затратам. Таким образом, совершенствование классических астрономических оптических инструментов с целью повышения их точности и удобства применения является важной задачей. Одним из ключевых направлений данных работ является автоматизация регистрации и обработки изображений, что позволит получать определяемые параметры в режиме реального времени. В настоящее время на кафедре астрономии Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) проводятся работы, связанные с отработкой методики наблюдений на пассажном инструменте, оснащенном КМОП-матрицей. С этой целью используется пассажный инструмент производства фирмы Vamberg, установленный на астрономической наблюдательной площадке СПбГУ. Для снятия астрономических изображений используется камера ZWO ASI-120MM-S с разрешением 1280×960 пикселей. Камера закреплена с помощью изготовленного методом 3D-печати адаптера. КМОП-технология для фоточувствительного элемента была выбрана в первую очередь потому, что в отличие от ПЗС она позволяет реализовать регистрацию момента засветки звездным изображением каждого пикселя в реальном масштабе времени с детерминированной задержкой. Однако в настоящее время применение КМОП-матриц в астрометрии не является общепринятым, а применение полупроводниковых матричных регистраторов излучения для целей КВНО не состоялось в силу того, что развитие данной технологии пришлось на время, когда РСДБ и ГНСС заменили классические оптические наблюдательные технологии. Поэтому необходимы работы по адаптации наблюдательных методик к возможностям КМОП-матриц. Целью настоящей работы является, во-первых, измерение временной задержки

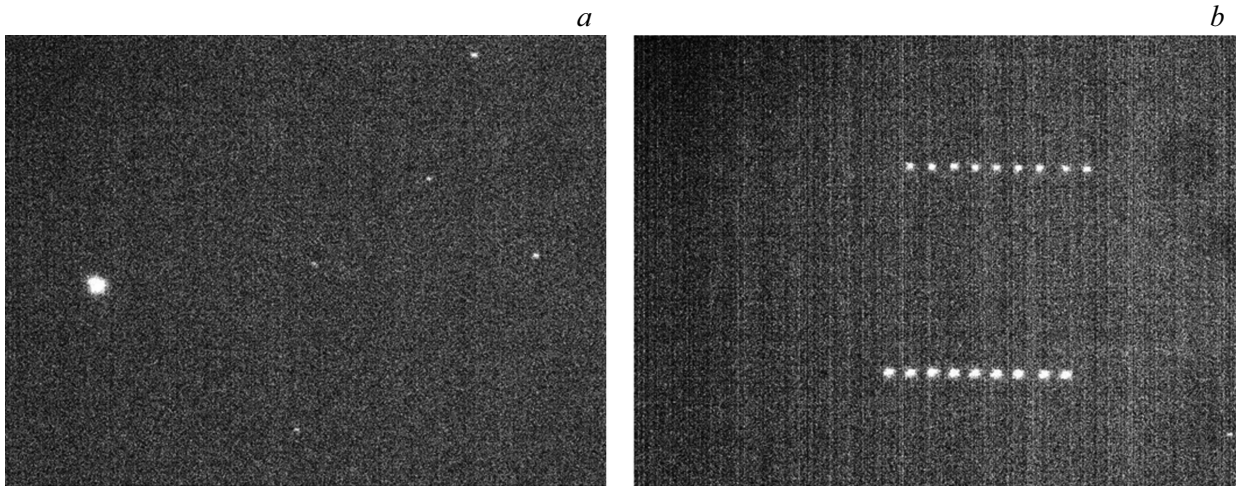


Рис. 1. *a* — одиночный снимок; *b* — сумма девяти кадров, полученных при помощи КМОП-матрицы.

регистрации моментов засветки пикселей при различных режимах работы матрицы и времени экспонирования. Во-вторых, необходим алгоритм фильтрации цифровых шумов, обеспечивающий надежную идентификацию каждой звезды в поле зрения и, наконец, алгоритм нахождения центра яркости звездного изображения в кадре.

Первая задача — измерение временной задержки регистрации — оказалась весьма сложной и была выделена в отдельную работу, результаты которой будут опубликованы позже.

В ходе проведения первых тестовых наблюдений на КМОП-матрице была выявлена проблема появления специфических для КМОП-матрицы артефактов изображений, а именно изменяющаяся со временем линейчатая структура, также называемая шумом фиксированного распределения.

Такой шум уже был описан и проиллюстрирован в [1]. Приведем пример изображений, полученных в ходе наших наблюдений. На одиночном снимке (рис. 1, *a*) линейчатая структура фона не сильно заметна, но при суммировании нескольких кадров (рис. 1, *b*) линейчатая структура фона отчетливо выделяется. Это может стать существенной проблемой, так как при автоматизированном выделении изображений звезд эти линии фона могут быть отождествлены как звездные треки.

Данное явление может быть обнаружено на кадре при помощи анализа зависимости медианы интенсивности от номера столбца (рис. 2). Из графика на рис. 2, *a* видно, что значения медианы интенсивности распределены не равномерно в некотором диапазоне, а занимают немногочисленные выделенные значения. Подобные отклонения не могут быть объяснены попаданием источников света, т.е. звезд, в часть столбцов ввиду того, что суммарная протяженность таких объектов вдоль столбца не может составить его половину в связи с их разреженностью на исследуемых кадрах. По прошествии значительного времени или при существенном изменении

создаваемой на светочувствительной матрице освещенности абсолютные величины таких отклонений яркости меняются, поэтому традиционный метод калибровки при помощи вычитания „бисов“, „дарков“ и „флэтов“, описанный в [2], не показал должной эффективности.

Точную физическую причину образования такого шума назвать однозначно не представляется возможным, поскольку детали реализации каждого отдельного взятого КМОП-сенсора не распространяются в виду того, что составляют коммерческую тайну. Но предлагается, что физическая причина такого поведения кроется в механизме оцифровки сигнала. В качестве наиболее вероятного объяснения физической природы данных артефактов в статье [2] было показано наличие минимальных различий в наборе столбцовых усилителей сигнала в матрицах рассматриваемого типа, каждый из которых усиливает сигнал, проходящий с определенных столбцов матрицы. Из-за того что они не могут это делать совсем одинаково (из-за погрешности при изготовлении), мы видим скачки интенсивности вдоль горизонтальной оси и довольно высокую однородность вдоль вертикальной. В силу того, что шум имеет неслучайный характер, при суммировании нескольких снимков повторяющаяся структура шума будет усиливаться, в то время как подвижные объекты не усиливаются из-за смены их положения на матрице. При суммировании достаточно небольшого количества кадров, около 10, интенсивность шума уже становится сопоставимой с интенсивностью слабых объектов в кадре. Необходимо отметить, что картина шума не является постоянной и со временем изменяется.

Так же в статье [3] была произведена классификация способов компенсации такой неоднородности изображений по типу лежащих в их основе методов с последующим сравнением их эффективности. Существуют и другие работы [4,5], в которых описывается проблема данного шума. Однако все методы, выделяемые авторами

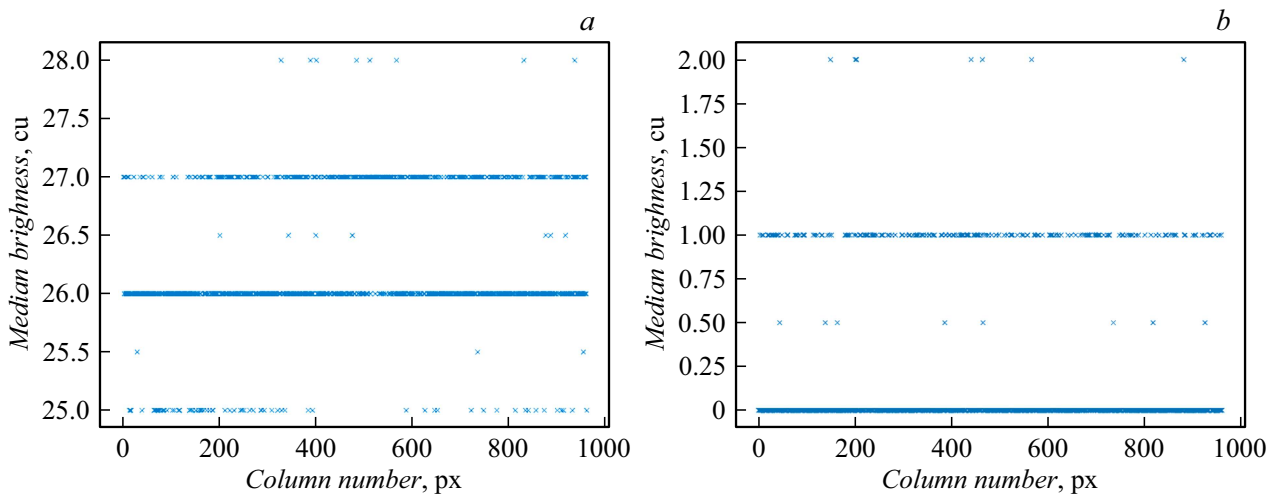


Рис. 2. Зависимость медианы интенсивности от номера столбца: *a* — зависимость медианы интенсивности в условных единицах освещенности пикселя от номера столбца для одиночного кадра; *b* — для разности двух кадров, разнесенных на несколько экспозиций.

как эффективные за исключением классического вычитания калибровочных кадров, в той или иной степени содержат в себе сглаживание, что пагубно сказывается на точности определения субпиксельных координат звезд в кадре, а значит, и на точности определяемых параметров (Всемирное время, долгота и др.).

Ввиду вышеизложенного было принято решение разработать альтернативный метод избавления кадров, созданных при помощи КМОП-матриц, от вертикальной линейчатой структуры. В ходе исследования данного явления стало ясно, что линейчатая структура очень мало меняется от кадра к кадру в рамках одной серии. Таким образом, вычитая из кадра кадр, снятый несколько экспозиций назад, или усредняя несколько таких кадров без видимого ухудшения изображений звезд, которые успевают значительно переместиться по кадру, можно избавиться от „полос“, не прибегая при этом к сглаживанию или другому размыванию исходного изображения. В целом изображение, полученное на КМОП-камеру, можно представить как

$$Y = U + S + N,$$

где Y — итоговое изображение, U — полезный сигнал, S — систематическая линейная структура, N — случайный шум. На коротких временных интервалах (около 15 мин [3–5], что превышает время нахождения типичной звезды в кадре), мы можем принять

$$S = \text{const.}$$

В таком случае, учитывая, что разность двух случайных шумов даст случайный шум, разность кадров можно описать как

$$Y_2 - Y_1 = (U_2 - U_1) + (N_2 - N_1) = (U_2 - U_1) + N.$$

Особенностью астрономических наблюдений методом прохождения является то, что мы наблюдаем, как правило, точечные объекты, движущиеся с постоянной известной скоростью. Положение объекта на следующем кадре не совпадает с положением объекта на предыдущем кадре, если они разнесены на достаточный промежуток по времени. Освещенность пикселя записывается целым числом, от 0 до 255 (при 8-битном шифровании), т. е. при рассмотрении разности второго и первого кадров получается, что из звезды на втором кадре мы вычитаем фон, а из фона на втором кадре мы вычитаем звезду. Чтобы вычитание звезды из фона не что приводило к появлению отрицательных значений освещенности, мы обнуляем значения таких пикселей. Фактически при обнулении отрицательных значений мы получим

$$Y_2 - Y_1 = U_2 + N.$$

На итоговом снимке мы получаем изображения звезд второго кадра, темные области на месте звезд первого кадра и неизбежный случайный шум. Полученный таким образом снимок более пригоден для дальнейшей обработки астрономических изображений стандартными средствами; звезды второго кадра на нем выделяются без проблем.

Приведем примеры изображений, откалиброванных предложенным методом. На (рис. 3, *a*), а показан одиночный снимок. На (рис. 3, *b*) показан снимок, полученный суммированием нескольких кадров, которые были откалиброваны предложенным методом. На обоих снимках отчетливо видно исчезновение характерного линейчатого фона, присутствующего на (рис. 1, *b*). Эффект от калибровки хорошо заметен на графике, представленном на (рис. 2, *b*), когда характерные значения медианной интенсивности освещенности столбца не превышают 2, в то время как до калибровки можно говорить о типичном

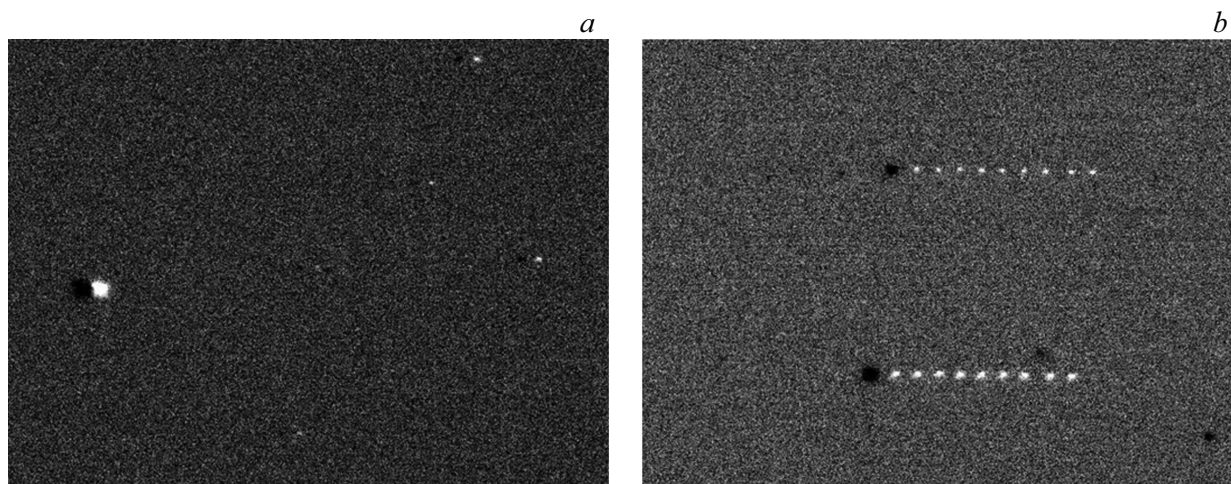


Рис. 3. *a* — одиночный снимок после калибровки; *b* — сумма нескольких кадров после калибровки.

значении медианной освещенности столбца около 26 или 27, таким образом, фоновая освещенность резко снижена. Временной интервал, на котором получены снимки, представленные на рис. 1, а также на рис. 3 составляет около 100 с.

Применение данной методики калибровки также уменьшает долю ложноположительных выделений источников при помощи программы SExtractor. Методика отличается простотой, однако она оптимизирована для наблюдений методом прохождения (инструмент неподвижен, а звезда или иной объект движется в поле зрения). Также важным достоинством метода является то, что для его применения не требуется изменение программы наблюдений, поскольку используются только предыдущие снимки серии. Таким образом, предложенная методика может применяться в реальном времени при автоматизации наблюдений и последующей обработки.

В ходе работ по адаптации методов наблюдений на пассажном инструменте к новым средствам регистрации, таким как КМОП-матрица, в рамках работы по модернизации пассажного инструмента была предложена новая методика калибровки изображений. Данная методика убирает специфический для КМОП-матриц шум фиксированного распределения, в отличие от традиционных способов калибровки, отработанных для ПЗС-матриц, она не требует формирования специальных калибровочных снимков в начале и в конце наблюдений, работает только с последовательностью рабочих снимков. Имеющаяся методика применима только для наблюдений методом прохождения, реализована только на пассажном инструменте. В будущем планируется продолжение работ, установка КМОП-матриц на другие приборы, такие как зенит-телескоп или универсальный астрономический инструмент. Соответственно, планируется отработка и адаптация разработанной методики под другие инструменты классической астрономии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

Список литературы

- [1] A. El Gamal, EE392B: Introduction to Image Sensors and Digital Cameras, Lecture Notes, Lecture 7: Fixed Pattern Noise, URL: <https://isl.stanford.edu/abbas/ee392b/lect07.pdf>
- [2] S. Howell. *Handbook of CCD Astronomy* (Cambridge: Cambridge University Press, 2006), p. 77-82. DOI: 10.1017/CBO9780511807909
- [3] T. Zhang, X. Li, J. Li, Z. Xu. *Appl. Sci.*, **10** (11), 369 (2020). DOI: 10.3390/app10113694
- [4] Y. Cao, Z. He, J. Yang, Y. Cao, M.Y.Y. Yang. *IEEE Photon. J.*, **9** (5), 1 (2017). DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2752000
- [5] T. Zhang, X. Li, J. Li, Z. Xu. *Sensors*, **20** (19), 5567 (2020). DOI: 10.3390/s2019556