

**ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ С ДЕТЕКТОРОМ
HAMAMATSU ORCA-QUEST QCMOS C15550-20UP
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

И. А. Страхов

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, МГУ

Проведено детальное исследование новейшего детектора Hamamatsu ORCA-Quest qCMOS C15550-20UP. Определены базовые характеристики, такие как шум считывания, темновой ток, коэффициент преобразования, нелинейность. Также изучена стабильность периода следования кадров. Смоделировано влияние так называемого эффекта скользящего затвора (англ. — *rolling shutter*) на оценку контраста при спекл-интерферометрических наблюдениях. Произведено сравнение спектров мощности, полученных при помощи детекторов ORCA и Andor iXon. Выявлены необходимые дополнительные методы редукции данных с детектора.

**USAGE FEATURES OF THE HAMAMATSU
ORCA-QUEST QCMOS C15550-20UP DETECTOR
AND ITS APPLICATION IN SPECKLE INTERFEROMETRY**

I. A. Strakhov

Sternberg Astronomical Institute Moscow University

A detailed study of the latest Hamamatsu ORCA-Quest qCMOS C15550-20UP detector has been carried out. Basic characteristics such as readout noise, dark current, conversion factor, and nonlinearity were determined. The temporal stability of frame acquisition has also been studied. The influence of the rolling shutter on the speckle interferometric contrast estimation was modelled. The power spectra obtained using ORCA and Andor iXon detectors were compared. Necessary additional methods of data reduction for the detector data have been implemented.

Введение

Спекл-интерферометрия позволяет оценить параметры двойственности звезд (разделение, контраст, позиционных угол), фактически достигая дифракционного разрешения при благоприятных условиях. Для таких наблюдений очень важно иметь надежный и хорошо изученный приемник света. Разумеется, нам необходим низкий уровень шума вкупе с высокой скоростью считывания, а также высокая квантовая эффективность.

До недавнего времени большой популярностью в области наблюдений с высоким разрешением пользовалась технология EMCCD (ПЗС с электронным усилением), как раз дающая прекрасные результаты как с точки зрения скорости, так и с точки зрения шума считывания.

Однако новейшие приемники CMOS продемонстрировали конкурентоспособность с EMCCD. Рассматриваемый приемник Hamamatsu ORCA-Quest qCMOS C15550-20UP имеет размер кадра 4096×2304 пкс, скорость считывания 120 полных кадров в секунду при шуме считывания $0.43 e^-$. В более медленном, но зато менее шумящем режиме считывания он позволяет считывать кадр со скоростью 5 кадров в секунду при шуме считывания $0.27 e^-$.

Благодаря своим прекрасным показателям этот детектор был выбран в качестве основного на усовершенствованном спекл-поляриметре [1], установленном на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ.

Прежде чем использовать этот детектор в научных наблюдениях, нам необходимо детально изучить его свойства и особенности работы с ним.

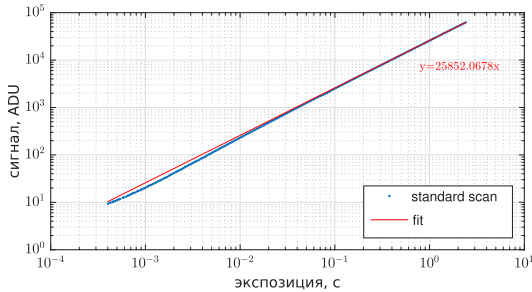


Рис. 1. Иллюстрация нелинейности в стандартном режиме считывания

Исследование детектора

Исследования базовых характеристик проводились для обоих режимов считывания кадра — стандартного (Standard scan) и медленного (Ultra quiet scan). Коэффициент преобразования оказался равен $0.1055 \pm 0.0005 \text{ e}^-/\text{ADU}$ для обоих режимов считывания. Шум считывания равен 0.422 e^- и 0.241 e^- для стандартного и медленного режима, соответственно. Темновой ток равен 0.013 e^- и $0.011 \text{ e}^-/\text{пкс}/\text{с}$ для стандартного и медленного режима, соответственно. Базовые характеристики — шум считывания, темновой ток, коэффициент преобразования — оказались удовлетворяющими спецификациям.

В ходе исследования обнаружена существенная нелинейность в области низких потоков (рис. 1). Измерения проводились при постоянном уровне освещенности и переменной экспозиции. Было проведено несколько таких экспериментов при различных уровнях освещенности. Нелинейность однозначна и воспроизводится во времени, а значит, ее можно исправить в процессе обработки.

Изучено распределение шума считывания (см. рис. 2). Оно показало себя значительно ближе к нормальному по сравнению с аналогичными величинами для EMCCD-детекторов Andor линейки iXon.

Также рассмотрена стабильность периода следования кадров. Для этого мы провели эксперимент со светодиодом, мигающим от 1PPS сигнала GPS модуля Ublox NEO-6M-0-001. Усредненный построчно сигнал на детекторе аппроксимировался функцией, зависящей от времени считывания, экспозиции, интервала между кадрами, момента вспышки светодиода, максимального и минимального значения сигнала (см. рис. 3). На основании проведенных экспериментов можно утверждать, что стабильность периода следования кадров с высокой точностью подтверждена (стабильность в пределах 5 мкс на интервале времени 5 мин.). Однако стоит заметить, что используемый драйвер (DCAM-API v4.0.6269b в системе Ubuntu 20.04) для работы с детектором выдает слегка некорректные значения частоты кадров и экспозиции. Так, выдаваемое драйвером значение периода между кадрами в стандартном режиме считывания на 7.2 мкс меньше, чем истинное значение. Методика измерения стабильности была верифицирована на модельных данных с учетом шума и известных факторов, влияющих на форму сигнала.

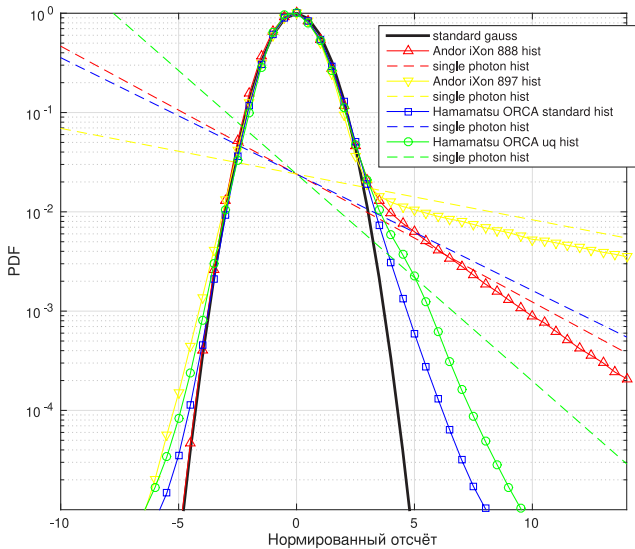


Рис. 2. Гистограммы попиксельных отклонений отсчетов одиночного кадра подложки от среднего кадра подложки по серии из 500 кадров. Отклонения нормированы на попиксельное стандартное отклонение шума считывания. На графике приведены распределения для обоих режимов считывания ORCA, а также для EMCCD-детекторов — Andor iXon 888 и iXon 897. Распределение для ORCA значительно ближе к нормальному, нежели оные для EMCCD-матриц. Отчасти это обусловлено отсутствием CIC-шума (Clock Induced Charge, см., например, [2])

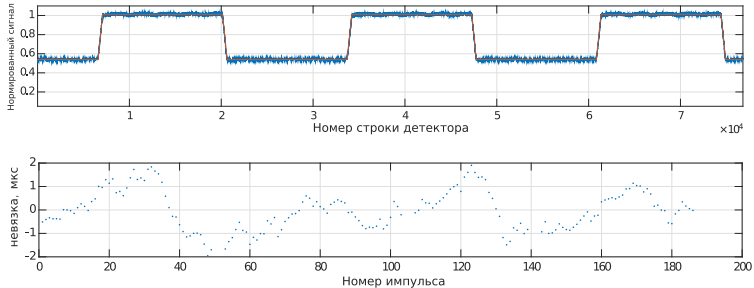


Рис. 3. Пример аппроксимации импульса и невязка линейной аппроксимации времен прихода импульсов

Было изучено влияние эффекта скользящего затвора на спекл-интерферометрические наблюдения при помощи модели получения изображений с детектора, реалистично учитывающей такие факторы, как скорость ветра, длину экспозиции, ширину фильтра, анизопланатизм, шум считывания, фотонный шум, aberrации телескопа и прочие. Показано, что влияние эффекта в режиме медленного считывания существенно влияет на оценку контраста при наблюдении объектов с разделением между компонентами больше $1''$. Однако на меньших разделениях влиянием этого эффекта можно пренебречь (см. рис. 4).

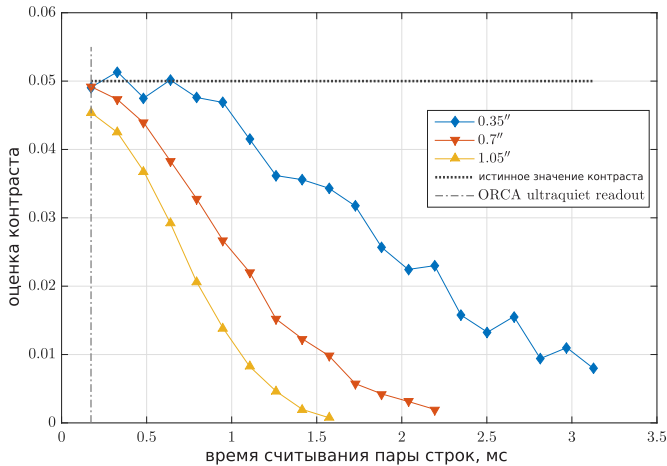


Рис. 4. Влияние эффекта скользящего затвора на оценку контраста при различных разделениях между компонентами в зависимости от времени считывания пары строк (в данном детекторе строки считываются попарно). Вертикальная черта (ultra quiet readout) — время, за которое считывается пара строк в малозумящем режиме считывания

На усредненных спектрах мощности кадров с детектора обнаруживается крестообразный артефакт. Разработана методика избавления от этого артефакта.

Кроме того, было произведено сравнение спекл-интерферометрических наблюдений с EMCCD Andor iXon 897 и с C15550-20UP. В подавляющем большинстве ORCA показал лучшие результаты соотношения «сигнал — шум» по сравнению с iXon.

Заключение

Исследованы важнейшие для спекл-интерферометрии характеристики детектора Hamamatsu ORCA-Quest qCMOS C15550-20UP. Разумеется, как и у любого устройства, у него есть свои особенности. Например, он проявляет существенную нелинейность в низких потоках, однако она исправляется на стадии обработки. Разработаны методы устранения подобных недостатков на стадии редукции. Сравнив наблюдения со старым и новым детектором, мы убедились в том, что детектор хорошо проявит себя в задаче спекл-интерферометрии и не только.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-72-10011.

Библиографические ссылки

- [1] Сафонов Б. С., Лысенко П. А., Додин А. В. Спекл-поляриметр 2.5-м телескопа: устройство и калибровка // Письма в Астрон. журнал. — 2017. — Т. 43, № 5. — С. 344–364.
- [2] Harpsøe K. B. W., Jørgensen U. G., Andersen M. I., Grundahl F. High frame rate imaging based photometry. Photometric reduction of data from electron-multiplying charge coupled devices (EMCCDs) // Astron. Astrophys. — 2012. — Vol. 542. — P. A23. 1202.3814.