

УДК 681.782.473:621.3.016.35

ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЕМССД-КАМЕРЫ ПРИ СЕКУНДНЫХ ЭКСПОЗИЦИЯХ

© 2025 И. В. Афанасьева^{1*}, В. Г. Орлов², В. И. Ардиланов¹,
В. А. Мурзин¹, Д. В. Опарин¹, А. Н. Буренков¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Институт астрономии, Национальный автономный университет Мексики, Мехико, 04510 Мексика

Поступила в редакцию 19 августа 2024 года; после доработки 5 декабря 2024 года; принята к публикации 25 января 2024 года

Мы представляем результаты тестирования ЕМССД-камеры iXon Ultra 888 для определения рабочих параметров короткоэкспозиционной фотометрии звезд. В результате тестирования были выбраны те режимы камеры, в которых временная нестабильность электронного умножения (ЕМ) заряда не оказывает существенного влияния на кривые блеска. Представлены результаты фотометрии затменно-переменной звезды ZTF J0038+2030, полученные на телескопе Цейсс-1000 САО РАН. На их основе мы показали преимущества и недостатки односекундных экспозиций для исследования переменных звезд.

Ключевые слова: *методы: наблюдательные — двойные: затменные — звезды: индивидуальные: ZTF J0038+2030*

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование ПЗС-матриц существенно расширило возможности наблюдательной астрономии (Howell, 2006). Тем не менее у камер на основе ПЗС есть один существенный недостаток: они не позволяют быстро считывать изображения с приемлемым уровнем шума. Камеры на основе ЕМССД (Electron Multiplication Charge-Coupled Device) лишены этого недостатка. ЕМССД обладают всеми преимуществами ПЗС-матриц, а также обеспечивают эффективное обнаружение единичных фотонов в условиях низкой освещенности за счет умножения заряда в специальном регистре (Robbins, 2011). При очень низких световых потоках (менее одного фотона на пиксель за кадр) и использовании электронного умножения чувствительность ЕМССД-камер значительно выше, чем у моделей ПЗС без умножения заряда (Rousset et al., 2014). Однако при световом потоке $F_l > 1$ фотон/пиксель может проявляться нестабильное поведение ЕМССД.

В настоящее время камеры ЕМССД широко используются в астрономии. Они применяются для получения изображений с высоким угловым разрешением с помощью «lucky imaging» (см., например, Маскау, 2013; Schlagenhauf et al., 2024) и методами спекл-интерферометрии (Maksimov et al.,

2009; Mitrofanova et al., 2020; Orlov, 2021), для поиска переменных звезд в центральных плотных областях шаровых скоплений (Skottfelt et al., 2015), для исследования быстрой переменности звезд типа ZZ Ceti в задачах астросейсмологии (Angeles and Orlov, 2021) и т.д. Реализуется проект использования ЕМССД для поиска и спектроскопии экзопланет в видимой области спектра с помощью коронографа на телескопе WFIRST¹ (Harding et al., 2015).

Andor iXon Ultra 888² является универсальной высокочувствительной, малошумящей и высокоскоростной ЕМССД-камерой. При определенных условиях ее квантовая эффективность может достигать 95% (Tulloch and Dhillon, 2011). Однако реализовать такую высокую эффективность на практике очень сложно. То же самое можно сказать и об электронном усилении G_{EM} (EM gain). Кроме того, многие астрономы в личных сообщениях отмечают временную нестабильность G_{EM} . Было отмечено, что в некоторых экспериментах камера не может поддерживать заданную температуру (Harpsoe et al., 2012), что приводит к падению электронного усиления, в некоторых случаях до единицы.

¹Wide Field InfraRed Survey Telescope.

²<https://andor.oxinst.com/products/ixon-emccd-cameras-for-life-science>

*E-mail: riv615@gmail.com

Перечисленные проблемы являются следствием неправильного выбора параметров камеры. Компания Andor Technology, производитель камеры, предоставляет пользователю возможность выбирать параметры, оптимальные для конкретной астрономической задачи. Производитель камеры iXon Ultra 888 указывает следующие характеристики и особенности: размер матрицы — 1024×1024 пикселей, размер пикселя — 13×13 мкм, максимальная скорость считывания — 30 МГц (26 кадров в секунду). Только эти характеристики камеры являются фиксированными. Все остальные возможности камеры, заявленные производителем, могут быть реализованы при специально подобранных параметрах эксперимента. Подробную информацию о характеристиках детектора данной камеры можно найти в работах Tulloch and Dhillon (2011), Harding et al. (2015).

Фон неба в кадре легко вычитается с помощью классических процедур. Однако «электронный нуль» (bias) и темновой ток ПЗС нестабильны. В данной работе исследуется только аппаратная часть, которая напрямую связана с моделью камеры.

Основной недостаток использования режима с электронным усилением — увеличение шума в изображении в $\sqrt{2}$ раз (Robbins and Hadwen, 2003). Этот параметр является фундаментальным и не зависит от выбранного значения G_{EM} . Поэтому, если объект довольно яркий и не позволяет использовать высокие значения усиления ($G_{EM} > 50$), выгоднее отключить электронное усиление.

Если настройки выбраны правильно и условия окружающей среды не меняются, камера будет работать достаточно стабильно. Однако во время наблюдений на телескопе может возникнуть необходимость задать другие настройки из-за изменения параметров окружающей среды или характеристик объекта. В этой статье мы анализируем изменение смещения и усиления камеры с течением времени в зависимости от выбранных параметров. Невозможно рассмотреть все потенциальные сценарии использования камеры, поэтому в данной работе мы ограничились случаем околосекундных экспозиций. Мы также описываем методику наблюдений и представляем результаты анализа временной стабильности iXon Ultra 888 в фотометрических исследованиях.

2. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ФОТОМЕТРИИ С СЕКУНДНЫМИ ЭКСПОЗИЦИЯМИ

Из-за высокого электронного умножения динамический диапазон у EMCCD в десятки и даже в

сотни раз меньше, чем у обычных ПЗС-детекторов. Поэтому необходимо использовать более короткие экспозиции, чтобы избежать насыщения. Использование секундных экспозиций имеет свои особенности.

2.1. Недостатки наблюдений с короткими экспозициями

К главным недостаткам фотометрии с короткими экспозициями следует отнести необходимость хранения больших объемов данных. Однако с уменьшением стоимости внешних дисков эта проблема теряет актуальность.

Еще один недостаток заключается в том, что изображение с короткой экспозицией имеет низкое отношение сигнал/шум (SNR) и основным источником шума является фотонный (пуассоновский) шум (Janesick, 2001). В результате современные методы построения кривых блеска, например метод анализа разностных изображений³ (Bramich et al., 2015; Oelkers and Stassun, 2018), требуют существенной доработки.

Тем не менее преимущества, которые можно получить при использовании коротких экспозиций, существенно перевешивают названные недостатки.

2.2. Преимущества

К очевидным преимуществам наблюдений с короткими экспозициями относится значительное уменьшение потерь наблюдательного времени, возможных из-за разного рода сопутствующих факторов. Отметим наиболее критичные из них.

1. Космические частицы.

Анализ большого числа короткоэкспозиционных изображений позволяет более качественно очистить данные от следов космических частиц (КЧ). В большинстве случаев после процедуры очистки в данных не остается следов от КЧ, поскольку все значения пикселей следов находятся ниже порога квантования.

В случае очень ярких КЧ автоматическую очистку изображений можно считать удовлетворительной, если след частицы не затрагивает изучаемые объекты или звезды сравнения.

В отличие от стандартного метода удаления следов частиц, описанного Puch (2004), мы строим временную гистограмму для каждого пикселя. Сначала мы ищем те пиксели, в которых гистограмма (с изолированным пиком) имеет большой разрыв между пиками. После чего в кадрах, значение пикселя в которых находится после пропуска в гистограмме, заменяем на значение до разрыва.

³Difference Image Analysis (DIA).

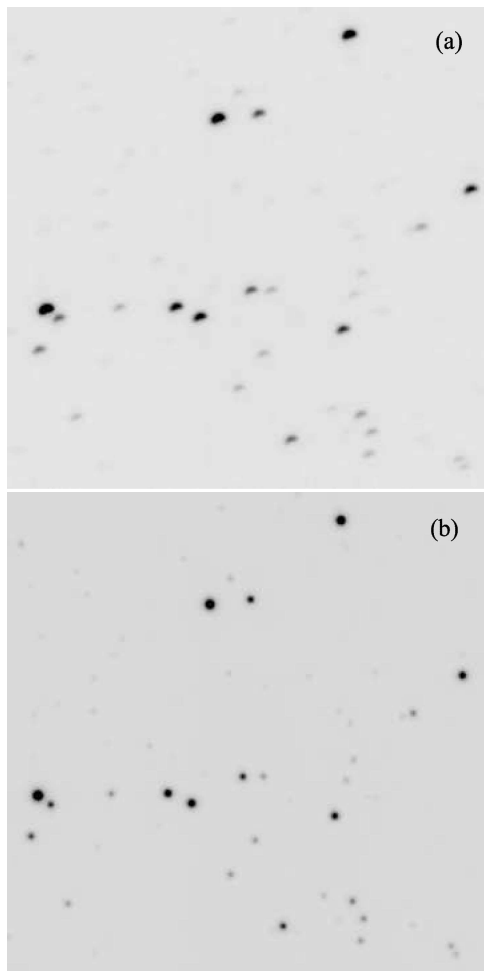


Рис. 1. Усредненные изображения серии из 1000 кадров с секундными экспозициями при наблюдении объекта Kepler-32f: без компенсации ошибок ведения телескопа (а) и после нее (б). Смещение объектов на панели (а) составляет $5''.5$ (9.6 пикселей).

2. Космический мусор.

В последнее время количество космического мусора в околоземном пространстве возросло настолько, что за ночь наблюдений даже в сравнительно небольшом поле зрения можно зарегистрировать несколько таких пролетов. Очистка этих изображений весьма затруднительна и, как правило, не дает удовлетворительных результатов.

В случае наблюдений с короткими экспозициями теряется всего несколько секунд наблюдательного времени, что является преимуществом использования EMCCD.

3. Ошибки гидирования и ведения телескопа.

Из-за ошибок механизмов ведения телескопа или из-за сбоев гидирования при наблюдениях происходит смещение положения объектов на изображении относительно предыдущего кадра. В этом случае все объекты на суммированном или усред-

ненном изображении серии кадров будут выглядеть вытянутыми, смазанными (см. рис. 1а). При наблюдениях с короткими экспозициями подобные эффекты могут быть легко компенсированы.

В настоящей работе для компенсации ошибок ведения мы использовали методику центрирования, описанную Orlov et al. (2014). Для примера на рис. 1 приведены усредненные изображения поля Kepler-32f до и после компенсации ошибок ведения (панели (а) и (б) соответственно).

3. СТАБИЛЬНОСТЬ КАМЕРЫ IXON 888 ULTRA ПРИ СЕКУНДНЫХ ЭКСПОЗИЦИЯХ

Поскольку основным фактором стабильности камеры является поддержание постоянной температуры, мы устанавливали температуру на уровне -60°C во всех лабораторных экспериментах и -80°C во время наблюдений на телескопе. Повышение температуры снижает коэффициент усиления камеры и увеличивает шум считывания (Hirsch et al., 2013), поэтому качество данных, получаемых в наблюдениях на телескопе, будет выше лабораторных.

Мы исследовали свойства камеры при отсутствии освещения и при равномерном освещении в спектральном диапазоне 450–700 нм с экспозициями 1 с на стенде плоского поля. Для снижения светового потока до приемлемых значений мы использовали нейтральный светофильтр (Neutral density filter) ThorLabs NE30A, установленный непосредственно перед окном камеры с помощью адаптера.

Данные собраны в режиме Non-Frame Transfer с различными значениями скорости вертикального смещения (Vertical Shift Speed, VSS) и частоты считывания (Horizontal Readout Rate, HRR) для двух вариантов электронного умножения сигнала перед считыванием: с усилением $G_{EM} = 300$ и $G_{EM} = 1000$.

Значение VSS характеризует время в микросекундах, необходимое для смещения кадра по вертикали на одну строку в сторону регистра сдвига. Эффективность переноса заряда снижается при более высоких скоростях вертикального смещения и приводит к ухудшению пространственного разрешения. Значение HRR характеризует горизонтальную скорость считывания пикселей из регистра сдвига.

Для этой камеры доступны четыре скорости вертикального сдвига (0.6, 1.13, 2.2 и 4.33 мкс) и четыре частоты считывания (1, 10, 20 и 30 МГц). На скорости 0.6 мкс кадры демонстрируют натекание и размазывание заряда даже при небольшом световом потоке (около 4000 ADU), поэтому мы исключили этот режим из исследования. Частота

Таблица 1. Временные изменения усиления $G_{EM} = 300$

HRR, МГц	VSS, мкс	Real gain, $e^- ADU^{-1}$	$E_{гр}$	Var, %	
				$F_l < 1$	$F_l = 9$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
10	1.13	33.4	0.1	0.11	0.21
	2.2	32.6	0.1	0.10	0.19
	4.33	32.8	0.1	0.10	0.18
20	1.13	26.3	0.2	0.22	0.43
	2.2	25.2	0.2	0.25	0.44
	4.33	25.6	0.2	0.20	0.40
30	1.13	31.7	0.2	0.27	0.55
	2.2	28.3	0.2	0.27	0.58
	4.33	28.6	0.1	0.28	0.54

Таблица 2. Временные изменения усиления $G_{EM} = 1000$

HRR, МГц	VSS, мкс	Real gain, $e^- ADU^{-1}$	$E_{гр}$	Var, %	
				$F_l < 1$	$F_l = 9$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
10	1.13	99.8	0.3	0.16	0.13
	2.2	98.3	0.2	0.15	0.11
	4.33	99.6	0.2	0.15	0.11
20	1.13	75.7	0.2	0.31	0.21
	2.2	71.8	0.1	0.31	0.23
	4.33	72.3	0.1	0.26	0.22
30	1.13	92.1	0.6	0.28	0.24
	2.2	83.3	0.3	0.28	0.26
	4.33	83.7	0.3	0.30	0.21

считывания 1 МГц была исключена из рассмотрения, поскольку она не удовлетворяет требованиям быстрой фотометрии.

3.1. Анализ темновых изображений

Для оценки стабильности мы получили серии по 1000 темновых односекундных изображений при закрытом затворе. Эти данные позволили оценить поведение камеры при слабых световых потоках ($F_l < 1$ фотон/пиксель), стабильность смещения во времени и реальное усиление камеры (Daigle et al., 2006).

В таблицах 1 и 2 приведены результаты тестирования камеры в различных режимах с усилением 300 и 1000 соответственно. В последних двух колонках таблиц указаны временные изменения усиления при разных световых потоках.

Уровень смещения «электронного нуля» зависит от усиления в регистре умножения и температуры детектора. Смещение состоит из двух частей: фиксированной, представляющей собой геометрическую закономерность, которая не меняется во время наблюдений, и переменной, не зависящей от координат пикселя, но меняющейся во времени. Переменная часть смещения может быть оценена как усеченное среднее темновых изображений. Как видно на рис. 2, смещение имеет небольшие временные вариации со стандартным отклонением около 0.58 ADU. Шум считывания камеры можно оценить после удаления фиксированной части смещения (Orlov, 2021).

На рис. 3 показана гистограмма значений темновых кадров при $G_{EM} = 1000$, $VSS = 2.2$ мкс, $HRR = 20$ МГц. Коэффициент усиления для этого режима составляет около $72 e^- ADU^{-1}$.

Чтобы отличить однофотонные события от ложных срабатываний, возникающих из-за шумовых событий, используется схема пороговой обработки. Порог устанавливается с учетом среднего коэффициента усиления электронного умножения (Basden et al., 2003) и составляет около 27 ADU.

Вероятность умножения заряда в EMCCD зависит не только от напряжения на электродах регистра умножения, но и от температуры сенсора (Plakhotnik et al., 2006). Стабильность этих двух факторов влияет на эффективность электронного умножения. Снижение температуры сенсора на $70^\circ C$ дает десятикратное умножение заряда. Для достижения высокого значения умножения сенсор необходимо охлаждать. В данной камере используется четырехступенчатый элемент Пельтье, который обеспечивает снижение температуры детектора на $80^\circ C$ ниже температуры окружающей среды. Основные характеристики используемой EMCCD-камеры приведены в таблице 3.

Несмотря на высокую чувствительность в условиях очень низкой освещенности, технология EMCCD имеет ряд недостатков. Механизм усиления, необходимый для снижения эффективного шума считывания до значений меньше чем $1e^-$, также вносит дополнительный источник шума, называемый мультипликативным шумом (Hupcsek and Nishiwaki, 2003; Robbins and Hadwen, 2003). Это увеличивает дробовой шум сигнала в 1.41 раза, что проявляется в увеличении изменчивости сигнала при низкой освещенности от пикселя к пикселю и от кадра к кадру.

Суммарный эффект мультипликативного шума проявляется в том, что полученное изображение

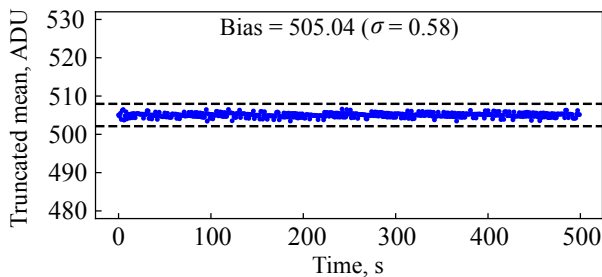


Рис. 2. График значений bias по кадрам, среднее значение смещения по всей серии составляет 505 ADU, стандартное отклонение — около 0.58 ADU. Штриховые линии ограничивают отклонение 5σ от среднего значения.

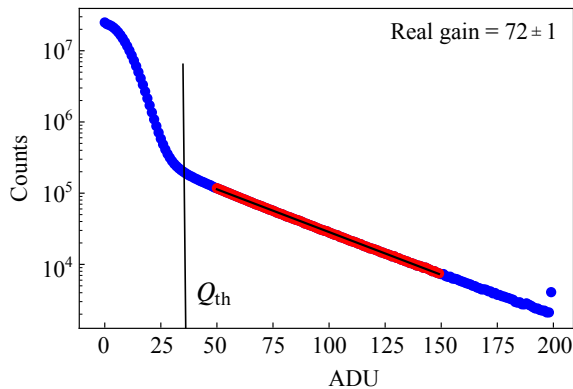


Рис. 3. Гистограмма значений темновых кадров. Указаны вычисленные значения коэффициента усиления (Real gain) и порога квантования Q_{th} .

имеет пониженное значение SNR, что статистически эквивалентно уменьшению вдвое квантовой эффективности камеры (Tulloch and Dhillon, 2011). Также необходимо учитывать ограничения динамического диапазона. Достичь высокого динамического диапазона при большом размере пикселя (от 13 до 16 мкм) возможно, но только при низкой скорости считывания. Таким образом, высокий динамический диапазон может быть достигнут только при меньшей частоте кадров (или уменьшении размера кадра за счет биннинга) и низком усилении.

У камер EMCCD также имеется и другой существенный недостаток — деградация усиления, которая проявляется при определенных температуре и напряжении (Evagora et al., 2012).

3.2. Анализ плоских полей

Для проверки стабильности выходного сигнала детектора в лабораторных условиях были собраны серии из 2000 односекундных изображений с равномерным освещением постоянным световым потоком на частоте считывания 20 МГц и скорости вертикального смещения 2.2 мкс.

Одна серия кадров была получена в «холодном» режиме, то есть прошло довольно много времени

Таблица 3. Характеристики камеры iXon 888 Ultra

Параметр	Значение
Детектор	E2V CCD201-20
Формат (элементы)	1024 × 1024
Размер элемента, мкм	13 × 13
Диагональ, мм	18.8
Шум считывания EM, e^-	< 1 @ -75°C
Темновой ток, e^- пиксель $^{-1}$ с $^{-1}$	0.00025 @ -80°C
Рабочая температура, $^\circ\text{C}$	$-55 \dots -95$

от предыдущей серии — 545 с (рис. 4а). Другая серия была получена через 32 с после завершения предыдущей (рис. 4б). Видно, что в каждом из режимов в первые 100–200 с интенсивность сигнала снижается, а затем выходит на устойчивый уровень насыщения с амплитудой изменения отсчетов 2–3%.

Этот факт можно объяснить ростом, а затем падением и стабилизацией электронного усиления. Изменение усиления может быть вызвано следующими причинами: во-первых, нестабильностью температуры детектора (в начале интенсивного считывания мы зафиксировали снижение, а затем повышение температуры детектора, см. рис. 4с); во-вторых, нестабильностью высоковольтного фазного напряжения на выходном регистре детектора.

Эти обстоятельства необходимо учитывать при фотометрических измерениях. Таким образом, перед основным наблюдением объекта рекомендуется считывать детектор не менее трех–пяти минут для достижения стабильного уровня усиления, при этом не должно быть длительных перерывов между сериями кадров.

4. НАБЛЮДЕНИЕ ЗАТМЕНИЯ ZTF J0038+2030

Наблюдения проводились 12 ноября 2022 г. на телескопе Цейсс-1000 Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) (Komarov et al., 2020) с главным зеркалом диаметром 1 м и фокусным расстоянием $F/13.3$. Для получения прямых изображений камера была установлена в фокусе Кассегрена, фильтры не использовались. Диаметр невиньетированного поля составлял $45'$, характерное качество изображений в погодных условиях Северного Кавказа около $1''5$. Прибор оснащен всем необходимым для высокоточных фотометрических

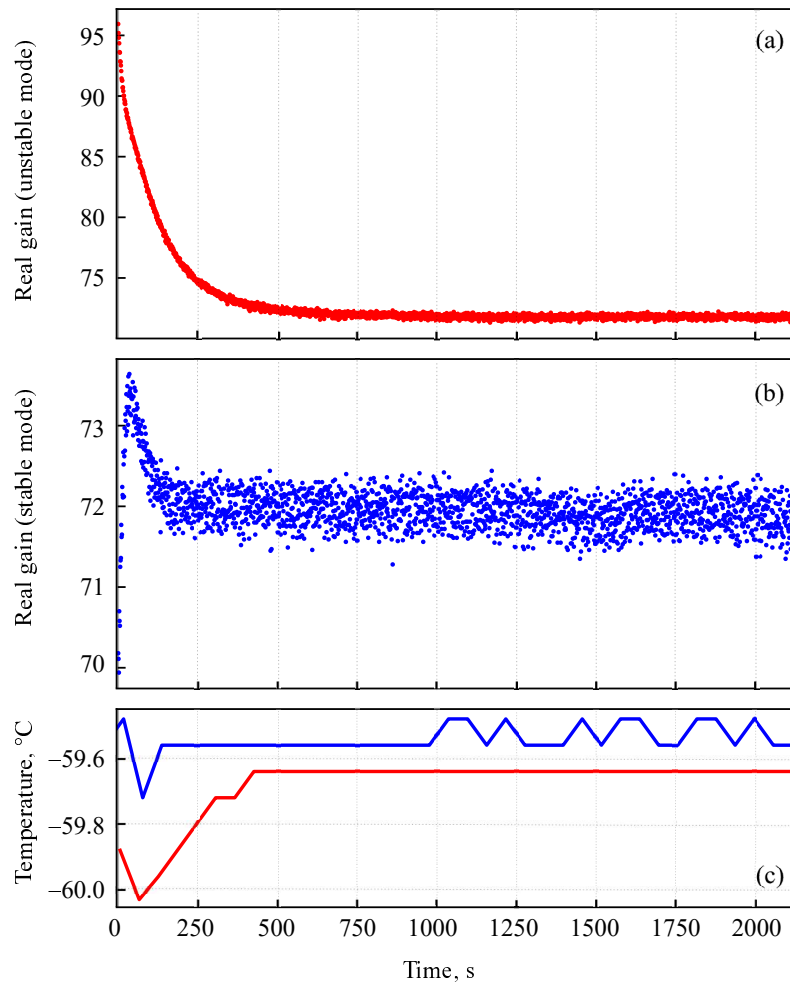


Рис. 4. Изменение коэффициента усиления в зависимости от времени при $G_{EM} = 1000$, $VSS = 2.2$ мкс, $HRR = 20$ МГц. График на панели (a) демонстрирует типичное поведение усиления в нестабильном режиме работы камеры, график на панели (b) — изменение усиления при устоявшемся режиме. На панели (c) приведена динамика изменения температуры во время измерений усиления в нестабильном и стабильном режимах камеры (красная и синяя линии соответственно).

исследований отождествленных транзитных событий. Поле зрения $3'46 \times 3'46$, масштаб $0''2028$ на пиксель для кадра без бинирования.

Основной научной целью тестовых наблюдений на телескопе Цейсс-1000 является проверка и отладка новой методики наблюдений быстропеременных объектов с помощью камеры EMCCD и получение максимально возможной информации о затменных звездах.

4.1. ZTF J0038+2030

Для калибровки методики измерений и определения точности фотометрии были проведены фотометрические исследования затменно-переменной звезды ZTF J0038+2030 (рис. 5) с известными параметрами. Эта звезда является белым карликом почти 18-й звездной величины с невидимым субзвездным компонентом (van Roestel et al., 2021). Фон неба составил 19 фотонов на пиксель.

К выбору объекта предъявлялись следующие критерии: наличие затмения во время наблюдений, высота объекта не ниже 60° над горизонтом и максимальная удаленность от Луны. При скорости считывания 20 МГц и времени накопления 1 с время экспозиции одного кадра в кинетической серии (KTC, Kinetic cycle time) составило 1.06526 с. Поскольку объект очень слабый, мы выбрали максимальное усиление: $G_{EM} = 1000$. Фактическое усиление (коэффициент преобразования) при выбранных параметрах составило $K = 71.8 e^- ADU^{-1}$. Всего было получено три серии по 1000 кадров.

4.2. Обработка данных

При потоках $F_l > 5$ фотон/пиксель в кадре EMCCD ведет себя как обычная малозумящая ПЗС, поэтому поток в пикселе определяется путем вычитания темнового значения и деления

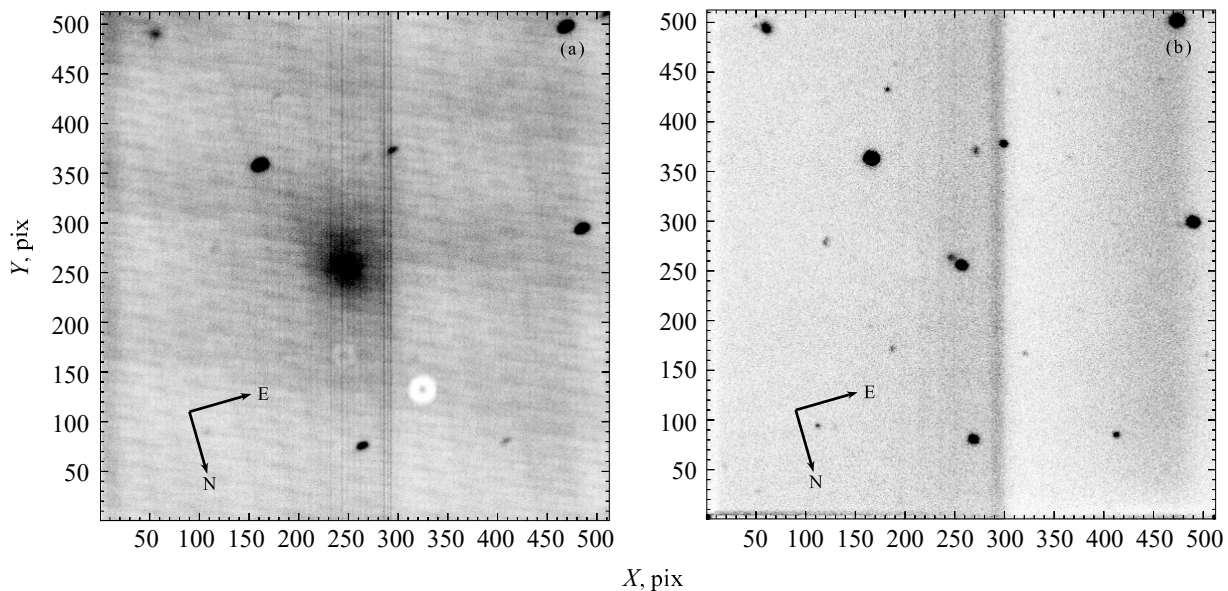


Рис. 5. Изображение затменно-переменной звезды ZTF J0038+2030 (в центре), полученное суммированием 1000 кадров: до обработки (a) и после нее (b). Размер кадра $3'46 \times 3'46$.

результата на реальный коэффициент усиления, при котором было получено изображение (Daigle et al., 2009):

$$I(x, y, t) = (I'(x, y, t) - D(x, y))/K,$$

где $I'(x, y, t)$ — интенсивность исходного изображения номер t в кубе данных в точке с координатами (x, y) , $I(x, y, t)$ — интенсивность исправленного изображения, $D(x, y)$ — робастная оценка серии темновых изображений в точке с координатами (x, y) , K — коэффициент преобразования (реальное усиление камеры). Для $F_l < 5$ фотон/пиксель оптимальным является преобразование (Rousset et al., 2014):

$$I(x, y, t) = \begin{cases} \text{int}[(I'(x, y, t) - D(x, y))/K], & \text{при } I'(x, y, t) \geq Q_{\text{th}}, \\ 0, & \text{при } I'(x, y, t) < Q_{\text{th}}, \end{cases}$$

где int — целая часть, Q_{th} — порог, полученный из гистограммы темновых изображений (см. рис. 3).

Следующим шагом является коррекция плоского поля. Мы вынуждены проводить эту процедуру для каждого кадра из-за изменений усиления. После этого мы исправляем ошибки ведения телескопа.

Последний этап предварительной обработки включает удаление следов космических частиц на изображениях. Так как после коррекции ошибок гидирования телескопа сигнал в изображении перестает подчиняться распределению Пуассона (Labbé et al., 2003), слабые следы частиц не могут быть удалены с использованием метода

построения временных диаграмм для каждого пикселя. В связи с этим рекомендуется применять другие методы очистки или выполнять процедуру удаления КЧ до корректировки ошибок гидирования.

После первичной обработки кадров данные могут обрабатываться любыми стандартными пакетами для фотометрического анализа данных. Мы использовали пакет *Photutils* (Bradley et al., 2024) из библиотеки *Astropy* (Price-Whelan et al., 2022). *Photutils* предоставляет инструменты для обнаружения и выполнения фотометрии астрономических источников и является пакетом *Python* с открытым исходным кодом.

Кривая блеска затмения ZTF J0038+2030 с секундным разрешением показана на рис. 6а. Если на кривой блеска отсутствуют краткосрочные события, ее можно улучшить, увеличив время экспозиции путем суммирования кадров.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные нами фактические значения усиления камеры существенно ниже заявленных производителем. Это связано с тем, что в нашем эксперименте использовалась температура выше требуемой. Чтобы получить более высокие значения усиления, необходимо снизить температуру до максимально допустимого уровня. Для поддержания этой температуры потребуется водяное охлаждение — только в этом случае можно рассчитывать на получение реального усиления, близкого к заявленному.

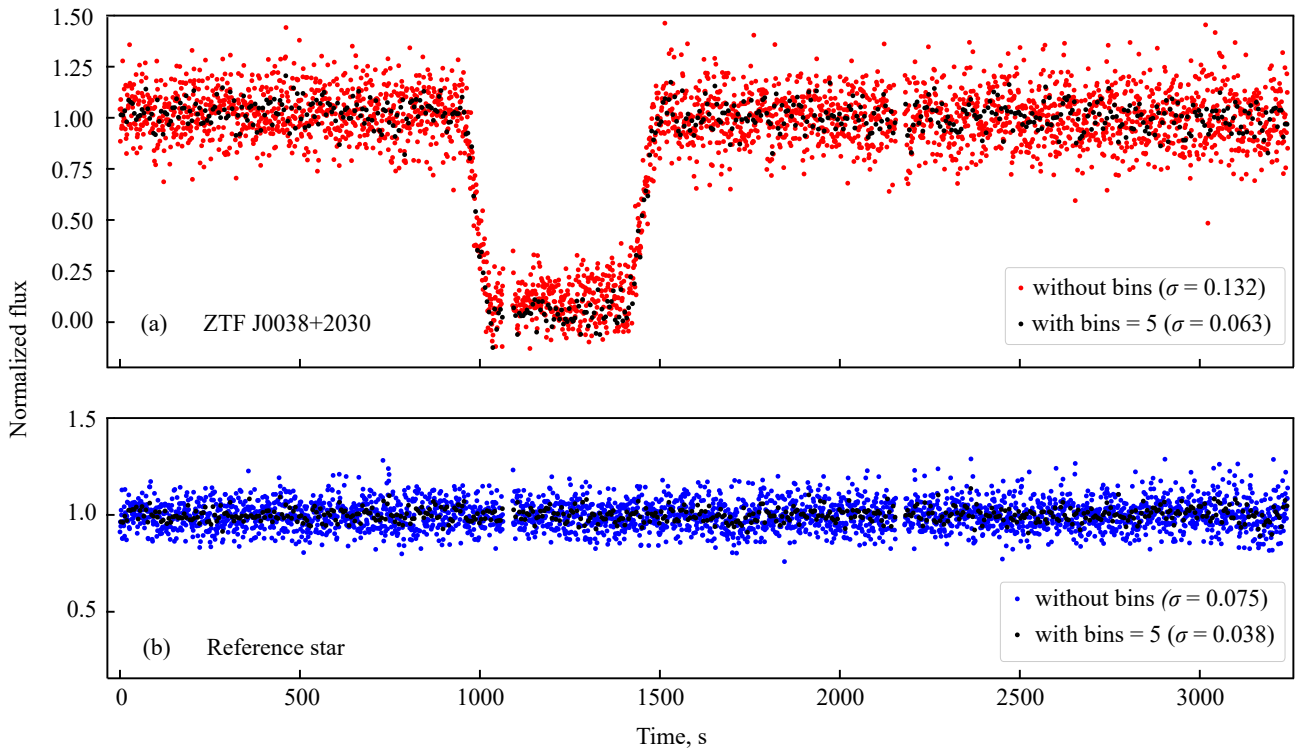


Рис. 6. Кривые блеска ZTF J0038+2030 (a) и звезды сравнения (b). На графиках приведены результаты измерений без предварительного суммирования данных (цветные точки) и с предварительным суммированием по пять кадров перед обработкой (черные точки).

Кроме того, необходимо установить предварительное усиление камеры на двойку. Однако даже в этих условиях при высоких световых потоках вряд ли удастся поддерживать реальное усиление на уровне, близком к заявленному производителем. Например, при установке температуры -70°C и предварительном усилении 2 камера стабилизируется на реальном усилении $110\text{ e}^{-}\text{ADU}^{-1}$, а при -60°C и предварительном усилении 1 она стабилизируется только на $30\text{ e}^{-}\text{ADU}^{-1}$.

Мы считаем, что сильное понижение температуры без применения водяного охлаждения не всегда оправдано, так как камера может не справиться с поддержанием такой температуры во время работы. Это способно привести к сбоям в работе камеры или даже к ее отключению. Мы рекомендуем использовать водяное охлаждение как гарантию стабильности работы при любых температурах окружающей среды, иначе реальное усиление камеры может быть ниже заявленного.

Отметим, что даже при низком реальном усилении камера позволяет эффективно проводить астрономические наблюдения с короткими экспозициями. Однако в этом случае практически невозможно достичь точности, необходимой для изучения экзопланет с высоким временным разрешением.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фотометрия с секундными экспозициями позволяет получать более качественные кривые блеска за счет устранения ошибок гидирования телескопа и коррекции кадров, испорченных пролетом спутников или следами космических частиц.

Камера EMCCD iXon888 Ultra хорошо подходит для проведения таких наблюдений, поскольку после выхода на стабильный режим она обеспечивает достаточное усиление светового потока. Вариации коэффициента усиления при выходе на стабильный режим не превышают 0.3% и 0.5% при установленном усилении 1000 и 300 соответственно. Время выхода на стабильный режим зависит от выбранного усиления и мощности светового потока. Как правило, оно не больше 10 минут даже при световом потоке более 30 фотонов на пиксель.

Наблюдения с секундными экспозициями затменно-переменной звезды ZTF J0038+2030 (яркость около 18^{m}) на 1-м телескопе позволили построить кривую блеска затмения со среднеквадратичным отклонением 13.2%. Увеличение экспозиции путем суммирования пяти кадров уменьшило ошибку кривой блеска более чем в два раза, до 6.3%.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. В работе использовались каталоги базы данных SIMBAD (<https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>) и Энциклопедии экзопланетных систем (<https://exoplanet.eu/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Данное исследование также поддерживается Dirección General de Asuntos del Personal Académico (UNAM, México) в рамках проекта IN114123.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Angeles and V. G. Orlov, *J. Astron. Telescopes, Instruments, and Systems* **7**, id. 038004 (2021). DOI:10.1117/1.JATIS.7.3.038004
2. A. G. Basden, C. A. Haniff, and C. D. Mackay, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **345**, 985 (2003). DOI:10.1046/j.1365-8711.2003.07020.x
3. L. Bradley, B. Sipőcz, T. Robitaille, et al., *astropy/photutils: 1.13.0* (2024). DOI:10.5281/zenodo.12585239
4. D. M. Bramich, E. Bachelet, K. A. Alsubai, et al., *Astron. and Astrophys.* **577**, id. A108 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201526025
5. O. Daigle, C. Carignan, and S. Blais-Ouellette, *SPIE Conf. Proc.* **6276**, id. 62761F (2006). DOI:10.1117/12.669433
6. O. Daigle, C. Carignan, J.-L. Gach, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **121** (882), 866 (2009). DOI:10.1086/605449
7. A. M. Evagora, N. J. Murray, A. D. Holland, et al., *J. Instrumentation* **7** (1), C01023 (2012). DOI:10.1088/1748-0221/7/01/C01023
8. L. K. Harding, R. Demers, M. E. Hoenk, et al., *J. Astron. Telescopes, Instruments, and Systems* **2** (1), id. 011007 (2015). DOI:10.1117/1.JATIS.2.1.011007
9. K. B. W. Harpsøe, M. I. Andersen, and P. Kjægaard, *Astron. and Astrophys.* **537**, id. A50 (2012). DOI:10.1051/0004-6361/201117089
10. M. Hirsch, R. J. Wareham, M. L. Martin-Fernandez, et al., *PLoS One* **8** (1), e53671 (2013). DOI:10.1371/journal.pone.0053671
11. S. B. Howell, *Handbook of CCD Astronomy*, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006).
12. J. Hunecek and T. Nishiwaki, *IEEE Transactions Electron Devices* **50** (1), 239 (2003). DOI:10.1109/TED.2002.806962
13. J. R. Janesick, *Scientific Charge-Coupled Devices* (SPIE Press, Bellingham, WA, 2001).
14. V. V. Komarov, A. S. Moskvitin, V. D. Bychkov, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 486–500 (2020). DOI:10.1134/S1990341320040112
15. I. Labbé, M. Franx, G. Rudnick, et al., *Astron. J.* **125** (3), 1107 (2003). DOI:10.1086/346140
16. A. F. Maksimov, Y. Y. Balega, V. V. Dyachenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **64** (3), 296 (2009). DOI:10.1134/S1990341309030092
17. A. Mitrofanova, V. Dyachenko, A. Beskakotov, et al., *Astron. J.* **159** (6), id. 266 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/ab8ae2
18. R. J. Oelkers and K. G. Stassun, *Astron. J.* **156** (3), article id. 132 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aad68e
19. V. G. Orlov, *Revista Mexicana Astronom. Astrofis.* **57**, 67 (2021). DOI:10.22201/ia.01851101p.2021.57.01.04
20. V. G. Orlov, D. Hiriart, and V. V. Voitsekhovich, *Revista Mexicana Astronom. Astrofis.* **50**, 87 (2014).
21. T. Plakhotnik, A. Chennu, and A. Zvyagin, *IEEE Transactions on Electron Devices* **53** (4), 618 (2006). DOI:10.1109/TED.2006.870572
22. A. M. Price-Whelan et al. (Astropy Collab.), *Astrophys. J.* **935** (2), id. 167 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac7c74
23. W. Pych, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **116** (816), 148 (2004). DOI:10.1086/381786
24. M. Robbins, *Single-Photon Imaging*, (Springer, Berlin, Heidelberg, 2011), pp. 103–121 DOI:10.1007/978-3-642-18443-7_6
25. M. S. Robbins and B. J. Hadwen, *IEEE Transactions Electron Devices* **50** (5), 1227 (2003). DOI:10.1109/TED.2003.813462
26. N. Rousset, J. Villeneuve, J.-H. Fournier-Lupien, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9154**, 91540F (2014). DOI:10.1117/12.2055350
27. S. Schlagenhauf, M. Mugrauer, C. Ginski, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **529** (4), 4768 (2024). DOI:10.1093/mnras/stae520
28. J. Skottfelt, D. M. Bramich, J. R. Figuera, et al., *Astron. and Astrophys.* **573**, id. A103 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201424967
29. S. M. Tullloch and V. S. Dhillon, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **411** (1), 211 (2011). DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.17675.x
30. J. van Roestel, T. Kupfer, K. J. Bell, et al., *Astrophys. J.* **919** (2), id. L26 (2021). DOI:10.3847/2041-8213/ac22b7

Photometric Stability of an EMCCD Camera at 1-s Exposures**I. V. Afanasieva¹, V. G. Orlov², V. I. Ardilanov¹, V. A. Murzin¹, D. V. Oparin¹, and A. N. Burenkov¹**¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia²Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 México

We present the results of testing an iXon Ultra 888 EMCCD camera to determine the operating parameters for short-exposure photometry of stars. As a result of testing, those camera modes were selected in which the temporal instability of the electron multiplication charge does not significantly affect the light curves. In addition, the photometry of the eclipsing variable star ZTF J0038+2030, obtained with the Zeiss-1000 telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, is presented. We have shown the advantages and disadvantages of 1-s exposures for studying variable stars.

Keywords: *instrumentation: detectors—methods: observational—binaries: eclipsing—stars: individual: ZTF J0038+2030*