

УДК 520.3

Дневное наблюдение звёзд слабой яркости (7^m-8^m) с равнинной местности

© 2017 г. С. Г. ГАРАНИН, АКАДЕМИК РАН; Л. И. ЗЫКОВ, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК;
А. Н. КЛИМОВ; С. М. КУЛИКОВ, ДОКТОР ТЕХН. НАУК;
С. П. СМЫШЛЯЕВ, КАНД. ТЕХН. НАУК; В. В. СТЕПАНОВ; А. Ю. СЮНДЮКОВ

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
г. Саров Нижегородской обл.

E-mail: zykov@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 03.05.2017

Приведены результаты регистрации звёзд в дневных условиях с использованием видеокамер с кремниевой фотоприёмной матрицей. Показано, что отношение сигнал/шум возрастает при увеличении глубины потенциальной ямы пиксела. Выбранные после предварительных испытаний видеокамеры RT-1000DC с потенциальной ямой ёмкостью 170 тыс. электронов и ВСА-304 с суммированием кадров до эффективной потенциальной ёмкости 600 тыс. электронов позволили в условиях типично дневной турбулентности атмосферы на равнинной местности в северной полусфере неба наблюдать звёзды слабой яркости 7^m-8^m .

Ключевые слова: дневное наблюдение звёзд, кремниевые видеокамеры, проникающая способность, отношение сигнал/шум, глубина потенциальной ямы фотоприёмника.

Коды OCIS: 110.0115, 040.1490.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с засорением космоса нефункционирующими искусственными спутниками Земли и их фрагментами, так называемым «космическим мусором» [1–3], а также наличием астероидной опасности [4], проблема наблюдения космического пространства приобрела особую актуальность как с позиций защиты от столкновения с «космическим мусором», так и с позиций экологической безопасности. Для мониторинга космического пространства с этой целью было бы весьма полезно освоить круглосуточное наблюдение космоса, а также наблюдение звёзд для возможности осуществления астронавигации [5].

Наблюдение космических объектов на фоне ночного неба даже с помощью небольшого любительского телескопа [6] и видеокамеры с кремниевой фотоприёмной матрицей, расположенных на равнинной местности на поверхности Земли, не вызывает трудностей вплоть до слабосветящихся объектов с блеском 9–13 звёздной величины. Однако наблюдение тех же объектов той же аппаратурой в дневных условиях вызывает трудности, уже начиная с относительно яркого объекта 3-й звёздной величины, которые всё более возрастают с уменьшением их яркости. Ухудшение про-

никающей способности при дневном наблюдении решающим образом связано с высоким фоном дневного неба, а также с большей турбулентностью атмосферы по сравнению с ночными условиями.

Наблюдению звёзд и космических объектов в дневных условиях посвящён ряд работ (например [7–11]), в которых для регистрации применялись, как правило, относительно крупные астрономические телескопы, размещённые в условиях с хорошим астроклиматом, характерным для обсерваторий. Ниже описаны результаты дневных наблюдений звёзд слабой яркости, осуществлённых с помощью телескопа с входной апертурой диаметром 200 мм и фокусным расстоянием 2 м, оснащённого видеокамерой с кремниевой фотоприёмной матрицей, в условиях равнинной местности юга Нижегородской области России.

При переходе от ночного к дневному наблюдению из-за значительного, на 7–8 порядков [11], возрастания фона свечения неба картинка изображения объекта становится слабоконтрастной. Из-за возрастания турбулентности атмосферы изображение звезды, имеющее вид пятна, увеличивается в размере, в ходе наблюдения меняет свою конфигурацию, центр тяжести изображения испытывает хаотические перемещения. И если в условиях

обсерваторий невысокая турбулентность атмосферы в ночных наблюдениях позволяет достигать углового разрешения менее 0,5 угловых секунд [12] (по уровню половины интенсивности в пятне изображения), то на равнинной местности в дневных условиях разрешение может ухудшаться до 5–10 угловых секунд. Качество картинки на фотоприёмной матрице и проникающая способность регистрации в конечном итоге определяется отношением сигнала к шуму [10, 13]

$$\frac{J_s}{J_n} = \frac{I_s \eta t_{\text{exp}}}{\sqrt{I_f \eta t_{\text{exp}} + i_m t_{\text{exp}} + N_R^2 + \sigma^2}}, \quad (1)$$

где I_s — количество фотонов в секунду, попавших на пиксел фотоприёмной матрицы в пятне изображения звезды, I_f — количество фотонов в секунду, приходящих на пиксел от фона неба рядом с изображением звезды, η — квантовая эффективность фотоприёмника (электрон/фотон), t_{exp} — время накопления сигнала (или время экспозиции), i_m — темновой ток фотоприёмника (электрон/с), N_R — шум считывания (в электронах), σ — пространственный шум, вызванный неравномерностью чувствительности по поверхности матрицы (в электронах).

Необходимо отметить, что пространственный шум σ далее не будет учитываться, поскольку существуют методы корректировки этого технологического шума, см. например [14–16]. Меры по уменьшению этого шума также предпринимались при проводимых нами съёмках.

Для условий регистрации звёздных объектов на фоне дневного неба собственными шумами матрицы по сравнению с фотонным шумом от неба можно пренебречь, и тогда расчётное выражение для отношения сигнал/шум принимает вид

$$\frac{J_s}{J_n} \approx \frac{I_s \sqrt{\eta t_{\text{exp}}}}{\sqrt{I_f}}. \quad (2)$$

Как видно из выражения (2), отношение сигнал/шум растёт пропорционально корню квадратному из времени экспозиции t_{exp} . То есть, увеличивая время экспозиции, можно улучшить качество наблюдения звёзд малой яркости и соответственно повысить проникающую способность регистрации. Максимальное время экспозиции t_{max} , когда приёмник ещё не достигает порога насыщения от яркого фона неба, определяется глубиной потенциальной ямы U (в электронах) элементарного фотоприёмника матрицы и числом фотонов, пришедших на этот элемент от фона неба

$$t_{\text{max}} \approx \frac{U}{I_f \eta}. \quad (3)$$

Тогда отношение сигнал/шум при работе фотоприёмной матрицы с однократной экспози-

цией максимально возможной длительности составит

$$\left(\frac{J_s}{J_n} \right)_{\text{max}} \approx \frac{I_s}{I_f} \sqrt{U}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что максимальное отношение сигнал/шум при переходе от одной матрицы к другой будет изменяться пропорционально корню квадратному из глубины потенциальной ямы её пиксела. С ростом потенциальной ямы будет возрастать отношение сигнал/шум и улучшаться проникающая способность при регистрации слабосветящихся космических объектов.

2. РЕГИСТРАЦИЯ ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ КАМЕРАМИ С РАЗНОЙ ГЛУБИНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЫ

В испытаниях использовались видеокамеры, которые были выполнены как на основе матричных ПЗС (приборы с зарядовой связью)-фотоприёмников, так и КМОП (комплиментарный металл-оксидный полупроводник)-фотоприёмников. В двух камерах Wat-100N [17] и RT-1000DC [18] использовалась ПЗС-матрица, глубина потенциальной ямы (зарядовая ёмкость) пиксела составляла соответственно 10 и 170 тыс. электронов. Ещё в двух камерах НХГ-40NIR [19] и ВСА-304 [20] применялась КМОП-матрица с ямой глубиной соответственно 13,5 и 30 тыс. электронов. Основные характеристики видеокамер приведены в табл. 1. Среди испытанных видеокамер необходимо обратить внимание на камеры RT-1000DC и ВСА-304. Первая из них имела большую потенциальную яму, что позволяло получить длительную однократную экспозицию при съёмке. Вторая осуществляла суммирование в реальном времени исходных «быстрых» кадров с частотой 500 Гц, экспозицией 2 мс до суммарной, довольно большой для яркого неба, экспозиции равной 40 мс. Суммирование 20 кадров осуществлялось встроенным в видеокамеру микропроцессором. Оно позволяло получить эффективную зарядовую ёмкость пиксела до 600 тыс. электронов. Таким образом, при испытаниях зарядовая ёмкость пиксела фотоприёмника изменялась от 10 до 600 тыс. электронов. При съёмке камерой ВСА-304 применялось 2×2 бинирование пикселей, так что объединённый пиксел имел размер 28×28 мкм.

Испытание видеокамер проводилось по регистрации Полярной звезды. Оптическая схема регистрации приведена на рис. 1. Исследуемые камеры устанавливались на два телескопа 3 и 4 и могли регистрировать звезду одновременно. Применялись телескопы ТАЛ-200К и Meade LX200GPS, которые имели одинаковое фокусное расстояние 2 м и одинаковый диаметр 200 мм входной апертуры. Телескопы закреплялись неподвижно, с помощью

Таблица 1. Параметры видеокамер Wat-100N, HXG-40NIR, RT-1000DC и BCA-304

	Wat-100N	HXG-40NIR	RT-1000DC	BCA-304
Тип и марка матрицы	ПЗС, ICX429ALL	КМОП, CMOSIS CMV-4000	ПЗС, KAI-1003M	КМОП, LUPA-1300
Размер матрицы, мм	6,4×4,8	11,26×11,26	13,1×13,1	17,9×14,3
Размер пиксела, мкм	8,6×8,3	5,5×5,5	12,8×12,8	14×14
Фактор заполнения пиксела	1	1	1	0,4
Глубина потенциальной ямы, ке	10*	13,5	170	30
Время экспозиции, мс	0,01–20	0,02–1000	0,3–10000	0,8–40
Частота кадров, Гц	25	28	25	500, 1000, 2000
Квантовая эффективность, электрон/фотон	0,5 на длине волны 0,6 мкм	0,55 на длине волны 0,6 мкм	0,48 на длине волны 0,51 мкм	0,59 на длине волны 0,69 мкм
Биннинг матрицы	–	2×1, 2×2	–	2×2, 3×3
Шум считывания, электрон	10	13	40	70
Темновой ток, электрон/с	1	125	2500	5000
Формат сигнала	Аналоговый	Цифровой, GigEthernet, 8,10,12 бит	Цифровой, CoaXpress, 8 и 12 бит	Цифровой, GigEthernet, 8 бит
Страна производитель	Япония	Германия	Россия	Россия

*Данные от производителя неизвестны. Приведено оцененное нами значение.

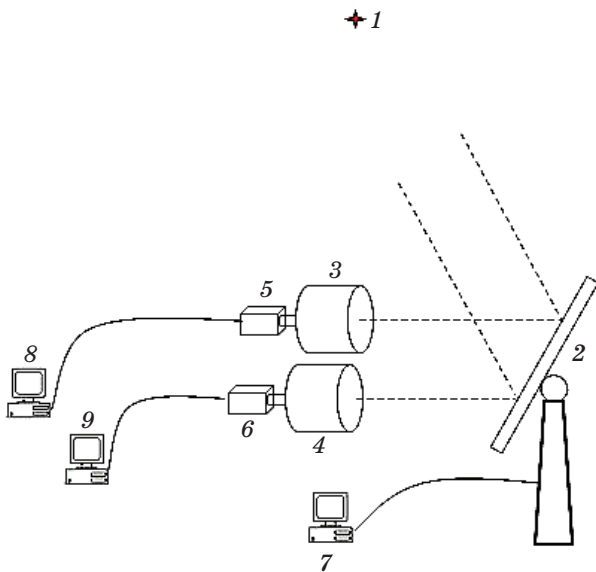


Рис. 1. Оптическая схема наблюдения звёзд.

небольших регулировок их оптические оси устанавливались параллельно. Свет от звезды 1 после отражения от зеркала 2 диаметром 760 мм с алюминиевым отражающим покрытием и прохождения телескопов 3 и 4 попадал далее на матрицы исследуемых видеокамер 5 и 6. Зеркало 2 было закреплено на опорно-поворотном устройстве, управление которым осуществлялось с помощью компьютера 7. Перед матрицами видеокамер устанавливался красный светофильтр типа КС-17 для выделения

спектральной области 0,67–1 мкм, в которой проводилась регистрация. Все детали оптической схемы были установлены на грунтовой поверхности в переносных лёгких укрытиях. Высота над уровнем моря, измеренная навигатором Garmin, составляла 150 м. Картинки изображений с видеокамер записывались на компьютеры 8 и 9. При каждом сеансе наблюдений записывалось 100 кадров видеоизображений. Их обработка проводилась с помощью программы ImageJ, количественно определялись амплитуды сигнала, фона, шума и отношение сигнал/шум [15]. При определении отношения сигнал/шум за сигнал принималась максимальная амплитуда в изображении звезды, а за шум — среднеквадратическое отклонение амплитуды фона рядом с её изображением в области 20×20 пикселей матрицы. Все амплитуды брались в цифровых единицах (ц.е.).

Наблюдение Полярной звезды проводилось 10 июля, 14 и 21 сентября 2015 г. в период от 10:00 до 15:00 часов местного поясного времени. Во все дни наблюдения на небе присутствовали кучевые облака, между ними — слабо выраженные слоистые облака и дымка. Съёмка проводилась в моменты времени, когда имел место разрыв между кучевыми облаками. Высота Солнца в ходе наблюдений изменялась от 24 до 52 градусов, угловое расстояние от него до Полярной звезды составляло от 67 до 90 градусов. Спектральная яркость свечения дневного неба на длине волны 550 нм изменялась от 20 до 60 Вт/м²·ср·мкм (о методике её измерения смотри ниже). Таким образом, условия регистрации были выражено дневными и близ-

Таблица 2. Результаты съёмки Полярной звезды видеокамерами с разной зарядовой ёмкостью пиксела

Видеокамера	Яркость фона неба (на $\lambda = 550$ нм), Вт/м ² ·ср·мкм	Время экспозиции, мс	Использованная зарядовая ёмкость, тыс. электрон	Отношение сигнал/шум
Wat-100N	60	2	8	13
HXG-40NIR	30	18	10	33
RT-1000DC	60–20	30–80	140–160	40–140
BCA-304	20	2×20	510	120

кими к полуденным для этого времени года. При съёмке звезды на всех видеокамерах варьировалось время экспозиции от минимальной (0,5–2 мс) до экспозиции, при которой происходило насыщение камеры (2–80 мс). По зарегистрированным снимкам определялась величина использованной зарядовой ёмкости по отношению фактической амплитуды сигнала к насыщающей.

Проведённые испытания показали (табл. 2), что отношение сигнал/шум растёт с увеличением времени экспозиции, но в разных видеокамерах достигает разных значений. Наименьшее значение сигнал/шум зарегистрировано для камеры Wat-100N, она насыщается при относительно короткой экспозиции (около 2 мс) и раньше других камер. Наибольшее — при съёмке видеокамерами RT-1000DC и BCA-304, у которых при экспозиции 40–80 мс насыщения ещё не происходит, но заполняется до 94% потенциальной ямы. Несмотря на то, что съёмка проходила при разной яркости неба, и это давало разброс в измерениях, хорошо виден рост отношения сигнал/шум при увеличении зарядовой ёмкости пиксела матрицы. Из табл. 2 видно в целом, что при увеличении зарядовой ёмкости пиксела от 8 до 510 тыс. электрон, т.е. в 64 раза, отношение сигнал/шум возрастает от 13 до 140, то есть в 10 раз. Отношение сигнал/шум увеличивается приблизительно пропорционально корню квадратному из глубины потенциальной ямы пиксела фотоприёмника. Если рассмотреть регистрацию с однократной экспозицией при одной яркости фона неба, например при 60 Вт/м²·ср·мкм, то при увеличении зарядовой ёмкости пиксела от 8 тыс. электрон (камера Wat-100N) до 140 тыс. электрон (камера RT-1000DC), то есть в 17,5 раз, отношение сигнал/шум возросло от 13 до 40, то есть в 3,1 раза. В этом случае отношение сигнал/шум также увеличивается в соответствии с выражением (4). Иначе выглядит ситуация, если сравнивать результат регистрации с однократной экспозицией камерой RT-1000DC с результатом регистрации при суммировании кадров камерой BCA-304 при фоне неба 20 Вт/м²·ср·мкм. Здесь при увеличении зарядовой ёмкости в 3,4 раза: от 160 тыс. электрон (камера RT-1000DC) до 510 тыс. электрон (камера BCA-304)

отношение сигнал/шум составляет соответственно 140 и 120 и не увеличивается, а даже несколько уменьшается. Причина этого может заключаться в более высоких исходных шумах камеры BCA-304, что характерно для КМОП-матриц, а также шумов, которые появляются при суммировании кадров в этой камере. Кроме того, на отношение сигнал/шум могло влиять то обстоятельство, что пятно изображения в сравниваемых камерах засвечивало разное количество пикселей матрицы. Вероятно, по этим причинам камера BCA-304 не показала лучшего результата регистрации по сравнению с камерой RT-1000DC. Тем не менее, наблюдение Полярной звезды показало, что более высокое отношение сигнал/шум при регистрации звёздных объектов может быть получено при использовании видеокамер RT-1000DC и BCA-304. Первая позволяла получить длительную однократную экспозицию за счёт глубокой потенциальной ямы, вторая — длительную экспозицию за счёт суммирования исходных, ещё ненасыщенных фоном неба, кадров. Отметим, что указанные видеокамеры были разработаны и изготовлены в России [18, 20]. Именно эти камеры использовались далее для регистрации звёзд слабой яркости.

3. ОЦЕНКА ЯРКОСТИ НЕБА И ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Регистрация звёзд с блеском 7^m и 8^m на фоне дневного неба проводилась 24, 25 сентября и 1, 14 октября 2015 года в период с 10:00 час до 16:00 час местного поясного времени. Погодные условия в дни регистрации были примерно одинаковые: визуально вся небесная сфера была без облаков, присутствовала слабая дымка. Область неба, в которой проводилась регистрация звёзд составляла по азимуту от 0,2 до 359 градусов, по высоте — от 44 до 87 градусов. Поскольку качество дневной визуализации и её проникающая способность зависят от яркости неба и турбулентности атмосферы, была проведена экспериментальная оценка этих атмосферных условий в регистрируемой области.

Измерение яркости неба осуществлялось видеокамерой RT-1000DC непосредственно в ходе наблюдения каждой слабой звезды. Эта камера была заре-

нее прокалибрована в лабораторных условиях, чувствительность её фотоприёмной матрицы на длине волны 532 нм составляла 0,013 ц.е./пкс·фотон (при 12-битной разбивке амплитуды). Фон неба, окружающий изображение звезды на снимке, регистрировался в широком спектральном диапазоне. При заданной форме кривой чувствительности матрицы [18] находилась интегральная по спектру чувствительность камеры, по методике описанной в [21], которая составила 0,008 ц.е./пкс·фотон. По известной теперь интегральной чувствительности определялся соответствующий интегральный световой поток от неба, упавший на матрицу видеокамеры. При заданной форме спектральной кривой излучения дневного неба [22] и измеренному видеокамерой интегральному световому потоку определялась спектральная кривая яркости фона неба. Измеренная таким способом спектральная яркость дневного неба во время регистрации звёзд слабой яркости находилась в интервале 14–43 Вт/м²·ср·мкм (приведена к длине волны 550 нм), что хорошо согласуется с результатами измерений, приведённых в [23] для сходных условий регистрации.

Оценка турбулентности атмосферы в ходе наблюдения проводилась по дрожанию центра тяжести изображения звезды. Такой параметр является одной из характеристик оптической нестабильности земной атмосферы [24, 25]. Оценка была проведена для одного сеанса наблюдений 1 октября в 10 часов 30 мин, использовалось изображение звезды Нодис секундус 3-й звёздной величины. Эта звезда имела координаты: высота 39,7°, азимут 24,5° и находилась внутри указанной выше области небосвода, в которой проводилась регистрация звёзд слабой яркости. Было обработано 100 кадров изображений звезды, снятых с экспозицией 75 мс видеокамерой RT-1000DC. Найденное среднеквадратическое отклонение центра тяжести от среднего значения составило 1,7 угл. сек (1,3 пиксела матрицы видеокамеры). Эта величина, пересчитанная к направлению на зенит, составляет 1,4 угл. сек и хорошо согласуется со среднеквадратической величиной дрожания (1–1,5 угл. сек) изображения края Солнца, измеренной в дневных условиях в открытой степи около Цимлянска [26]. При этом угловое разрешение, о котором говорилось ранее, (по ширине пятна изображения на полувысоте) составляло около 6 угловых секунд. Таким образом, проведённые наблюдения звёзд слабой яркости происходили при умеренной яркости дневного неба и хорошо выраженной дневной турбулентности земной атмосферы.

4. РЕГИСТРАЦИЯ ЗВЁЗД СЛАБОЙ ЯРКОСТИ

Для регистрации звёзд слабой яркости использовались видеокамеры RT-1000DC и ВСА-304, показавшие лучшие результаты при наблюдении По-

лярной звезды. В табл. 3 приведены условия регистрации звёзд слабой яркости (с блеском 7^m–8^m) на фоне дневного неба. Название звёзд, их блеск и классификация спектра взяты из каталога Catalogue of Positions and Proper Motions (PPM). Наблюдение звёзд проводилось 24, 25 сентября и 1, 14 октября 2015 г. в период от 9:55 до 16:00 часов местного поясного времени. Звёзды регистрировались при высоте Солнца, изменяющейся в диапазоне от 12° до 29°. Угол элонгации, т.е. угловое расстояние от регистрируемой звезды до Солнца, изменялся от 47° до 113°. Спектральная яркость неба в наблюдаемом поле зрения приведена на длине волны 550 нм в энергетических единицах (Вт/м²·ср·мкм) и также в астрономических единицах (зв. вел./угл. с²). В условиях наблюдений яркость неба изменялась в диапазоне от 14 до 43 Вт/м²·ср·мкм (от 4,8 до 3,7 зв. вел./угл. с²), т.е. примерно в 3 раза.

Чтобы уменьшить вероятность ошибки в отождествлении звезды, по каталогу PPM выбирались в основном две близкорасположенные звезды, на которые затем направлялось поле зрения видеокамер. В табл. 3 приведены данные только для самой слабосветящейся звезды из регистрируемых пар звёзд. Время экспозиции на видеокамере RT-1000DC изменялось в интервале от 55 до 120 мс, а частота кадров — соответственно от 18 до 8 кадров в секунду. Съёмка звёзд видеокамерой ВСА-304 проводилась с частотой 500 Гц при экспозиции одного кадра 2 мс, далее каждые 20 кадров суммировались в реальном времени до экспозиции 40 мс и выдавались на выход с частотой 25 кадров в секунду. При каждом сеансе наблюдений записывалось около 100 кадров видеоизображений, однако обработке подвергалось 5–10 кадров. За четыре сеанса наблюдений была проведена в общей сложности съёмка 12 звёзд яркостью от 7^m до 8,4^m.

Обнаружение и отождествление изображений звёзд слабой яркости в поле снимков с видеокамеры проходило с некоторым напряжением. Это было связано с тем, что регистрация осуществлялась вблизи шумов, проявляющихся в виде «ряби» на снимках, и обнаружение проходило не сразу. Время, которое затрачивал оператор на поиск и обнаружение слабого изображения звезды в поле видеоснимка, составляло от 3 до 30 с. На рис. 2 приведены характерные снимки звёзд слабой яркости с видеокамер RT-1000DC и ВСА-304 в таком виде, как их наблюдали участники, а на рис. 3 пространственные распределения амплитуды сигнала тех же снимков, полученные в объёмном виде с помощью программы ImageJ. Снимки были записаны при использовании функции вычитания кадра с фоном неба при регистрации в реальном времени.

Обработка снимков с калиброванной камеры RT-1000DC показала, что отношение интегралов

Таблица 3. Условия регистрации звёзд с блеском 7^m–8^m на фоне дневного неба

Дата и время регистрации	Название звезды	Блеск и спектр	Высота и азимут Солнца, град	Угол элонгации, град	Яркость неба, Вт/м ² ·ср·мкм (зв.вел/угл.сек ²)	Отношение сигнал/шум	
						RT-1000DC	BCA-304
24.09.15, 16:00	Мю-2 Волопаса	7 ^m , K0	16,2; 244,7	59,7	18 (4,62)	4	4,5
25.09.15, 9:55	25 Рыси	7 ^m , K0	28,9; 144,1	72,5	20 (4,5)	5,8	4,4
25.09.15, 15:27	18 Цефея	7 ^m , M2	20; 237,1	113	17 (4,68)	7,8	6,5
1.10.15, 14:37	HR-5184	7 ^m , K0	23,2; 224,4	81,7	17 (4,68)	8	6,5
1.10.15, 14:40	SAO 002460	8 ^m , K0	22,9; 225,2	90,7	17 (4,68)	6,7	5,5
1.10.15, 14:53	SAO 002558	8,4 ^m , G5	21,6; 228,4	86	16 (4,7)	3	2,5
1.10.15, 15:26	SAO 006363	8 ^m , K2	17,8; 236,1	89,1	17 (4,68)	6	4,1
1.10.15, 15:40	SAO 009426	8,3 ^m , F5	16,0; 239,3	95,4	14 (4,84)	5,5	3
14.10.15, 11:27	HR-5184	7 ^m , K0	26,9; 172,8	86,1	17 (4,68)	5,3	6,3
14.10.15, 11:37	25 Рыси	7 ^m , K0	27,0; 175,6	89,3	23 (4,38)	6,7	7,3
14.10.15, 11:50	HR-4953	7,3 ^m , K0	27,1; 179,2	70,0	20 (4,5)	5,6	5,6
14.10.15, 13:27	HR-5180	7,1 ^m , K0	24,0; 205,6	47,0	43 (3,7)	4,7	5
14.10.15, 13:49	28 Большой медведицы	7,1 ^m , F2	22,5; 211,3	81,8	18 (4,62)	4	4,5
14.10.15, 13:57	SAO 043732	8 ^m , K5	21,9; 213,4	61,7	22 (4,39)	5,7	3
14.10.15, 14:29	SAO 002558	8,4 ^m , G5	19,1; 221,3	89,7	16 (4,75)	2,5	2,5
14.10.15, 15:34	Мю-2 Волопаса	7 ^m , K0	12,1; 236,3	54,4	24 (4,34)	4	5

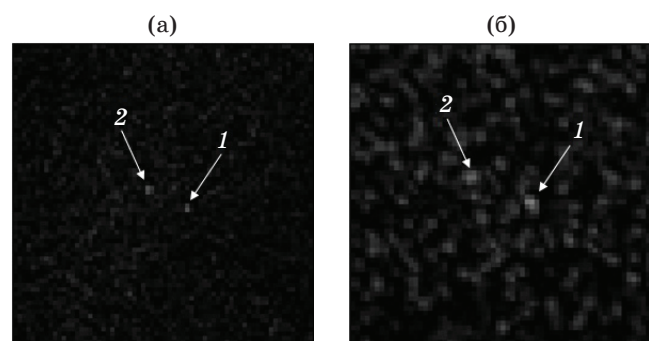


Рис. 2. Снимки звёзд слабой яркости. Звезда SAO 002556 (1) с блеском 6,6^m и SAO 002558 (2) с блеском 8,4^m с видеокамеры RT-1000DC (а) и BCA-304 (б). Время съёмки 14:29 час от 14.10.15 г. Угловое расстояние между звёздами — 0,5 угл. мин., размер снимка 3×3 угл. мин.

в пятнах изображений пар регистрируемых звёзд в основном хорошо (не хуже 20%) согласуется с отношением яркостей в звёздных величинах, указанных в каталоге PPM. Исключение составляет отношения интегралов для нескольких пар слабосветящихся звёзд. Например для звёзд SAO 002556 с блеском 6,6^m и SAO 002558 с блеском 8,4^m и угловым расстоянием между ними 0,5 угловых минуты интегральный сигнал в пятне яркой звезды больше, чем в пятне менее яркой в 1,7 раза, а из соотношений звёздных блесков должен быть в 5 раз больше. Такое несоответствие вероятно связано с большой погрешностью определения интеграла изображения, возникающей из-за больших шумов регистрации.

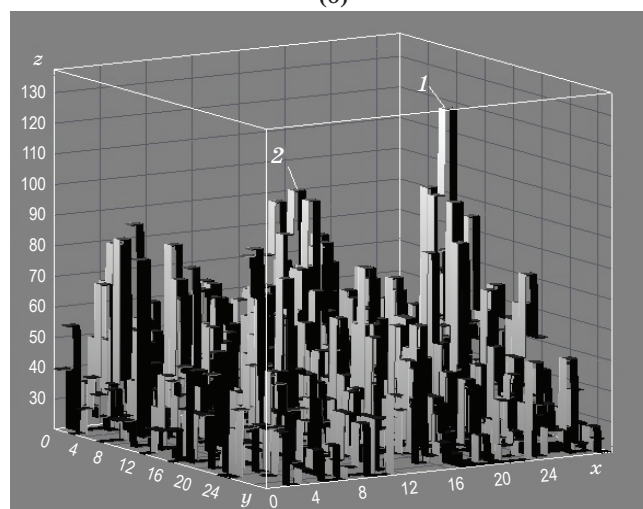
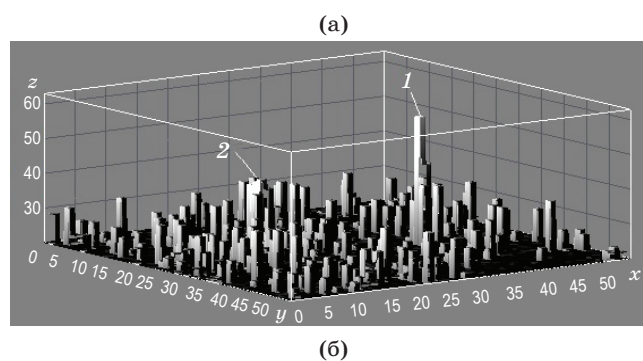


Рис. 3. Пространственное распределение амплитуды на снимках звёзд SAO 002556 (1) и SAO 002558 (2), полученных видеокамерой RT-1000DC (а) и BCA-304 (б). Угловой размер снимка — 1,5 угл. мин.

Регистрация звёзд малой яркости проходила при максимально возможном времени экспозиции, которое позволяла сделать существующая яркость фона неба и глубина потенциальной ямы пиксела фотоприёмной матрицы. В проведённых регистрациях потенциальная яма пиксела в камере RT-1000DC заполнялась на 55–94%, временной шум составлял 9–12 ц.е., а оставшаяся после вычитания фонового кадра часть пространственного шума 0,5–1 ц.е. (в 12-битном формате). Наполненность потенциальной ямы в камере ВСА-304 была примерно такая же, однако временной и пространственный шум были больше и составляли соответственно 35–50 ц.е. и 9–18 ц.е. Отношение сигнал/шум для регистрируемых звёзд составляло 2,5–8.

Таким образом, для успешной регистрации космических объектов на ярком фоне дневного неба необходимо использовать видеокамеры, обладающие большой зарядовой ёмкостью пиксела или способные осуществлять суммирование исходных

кадров до максимально возможной длительности экспозиции, и имеющие низкие пространственные шумы по поверхности матрицы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показано, что при регистрации звёзд в дневных условиях с использованием видеокамер с кремниевой фотоприёмной матрицей качество визуализации и отношение сигнал/шум увеличиваются при увеличении глубины потенциальной ямы (зарядовой ёмкости) пиксела.

Выбранные после предварительных испытаний видеокамеры RT-1000DC с зарядовой ёмкостью 170 тыс. электронов и ВСА-304 с суммированием кадров до эффективной зарядовой ёмкости 600 тыс. электронов, позволили на телескопе с зеркалом диаметром 200 мм и фокусным расстоянием 2 м в условиях типично дневной турбулентности атмосферы в северной полусфере неба наблюдать звёзды слабой яркости 7^m – 8^m при соотношении сигнал/шум 2,5–8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масевич А.Г. Проблема загрязнения космоса (космический мусор) // Сб. научных трудов. М.: Космосинформ, 1993. 150 с.
2. Тарасенко И.В., Юрасов В.С., Коноплев А.О., Михнев К.Н. Методы и технические средства обнаружения и измерения параметров движения космического мусора // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 8. С. 55–59.
3. Свиридов К.Н., Белкин Н.Д. Наземная космическая система для контроля космического мусора // Конверсия в машиностроении. 1997. № 3. 36 с.
4. Артемьева Н.А., Баканас Е.С., Барабанов С.И., Витязев А.В., Волков В.А., Глазачев Д.О., Дегтярь В.Г., Емельяненко В.В., Иванов Б.А., Кочетова О.М., Куликова Н.В., Медведев Ю.Д., Нароенков С.А., Немчинов И.В., Печерникова Г.В., Поль В.Г., Попова О.П., Рыхлова Л.В., Светцов В.В., Симонов А.В., Соколов Л.Л., Тиммербаев Р.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А., Шувалов В.В., Шустов Б.М. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра // Под. ред. Шустова Б.М., Рыхловой Л.В. М.: Физматлит, 2013. 384 с.
5. Авзалов И.З., Бажанов Ю.В., Бакун П.А., Березенцев М.Ю., Карпов А.Н., Малышева З.М., Шаргородский В.Д., Шумилов Ю.П. Оптико-электронная система для дневного наблюдения космических объектов на фоне звёзд // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14. № 12. С. 17–23.
6. Камус С.Ф., Липин Н.А., Сокольский М.Н., Левандовская Л.Е., Денисенко С.А. Любительские телескопы // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 9. С. 81–83.
7. Rork W., Lin S.S., Yakutis A.J. Ground-based electro-optical detection of artificial satellites in daylight from reflected sunlight // Project report ETS-63. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts. 1982. 49 p.
8. Бондарь С.Ф., Выгон В.Г., Маланин А.В., Шилин В.Д. Оценка возможности наблюдений ИСЗ пассивными оптическими средствами в сумеречных и дневных условиях // Оптический журнал. 1994. № 3. С. 70–76.
9. Chesser D., Vunck D., Born T., Axelson W., Rehder K., Medrano R. NIR daylight acquisition sensor improves mission capabilities // Proc. SPIE. 2003. V. 5082. P. 1–12.
10. Roggemann M.C., Douglas D., Therikildsen E., Archambeault D., Maeda R., Schultz D., Wheeler B. Daytime image measurement and reconstruction for space situational awareness application // AMOS. 2010. 14–17 September. Maui. Hawaii. USA. P. 172–184.
11. Гришин Е.А., Мелков С.Н., Миловидов В.Л. Инфракрасная камера на основе барьеров Шоттки для дневных наблюдений звёзд // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 2. С. 83–86.
12. Новиков С.Б., Овчинников А.А. Пределные возможности получения наземными телескопами изображений астрономических объектов с высоким угловым разрешением // Сб. статей. Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп. Ленинград: Наука, 1988. С. 14–17.
13. Евтихеев Н.Н., Краснов В.В., Родин В.Г., Солякин И.В., Стариков С.Н., Черёмхин П.А., Шапкарина Е.А. Увеличение отношения сигнал/шум за счёт пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. 2012. № 4. С. 122–136.

14. Брондз Д.С., Харитоновна Е.Н. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-го порядка [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. 2008. № 11. С. 29.
15. Зыков Л.И., Лебедев В.А., Смышляев С.П., Степанов В.В., Сюдюков А.Ю. Оценка проникающей способности визуализации звёзд на фоне дневного неба переменной яркости // Сборник докладов IX Всероссийской школы студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. 2015. С. 197–203.
16. EMVA Standard 1288. Standard for characterization of image sensors and cameras. Release 3.0. November 29, 2010. Issued by European Machine Vision Association. 36 p.
17. Веб страница фирмы Watec. 2014.
18. Цифровая камера RT-1000DC. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ООО Растр Технолоджи. 2014. 33 с.
19. Цифровая камера HXG-40NIR. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Фирма Baumer Optronic. 2012. 15 с.
20. Видеокамера с переменной частотой суммирования. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЗАО НПК Видеоскан. 2014. 40 с.
21. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы. М. Энергия, 1974. 132 с.
22. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. Пер с англ. / Под ред. Карасева А.Б. М.: Мир, 1987. 550 с.
23. Яркость дневного безоблачного неба (экспериментальные данные). Справочник. Ленинград: Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, 1971. 164 с.
24. Васильев О.Б. О зависимости дрожания звёзд от зенитного расстояния // Оптическая нестабильность земной атмосферы. М.: Наука, 1965. С. 40–48.
25. Колчинский И.Г. К вопросу о зависимости дрожания изображений звёзд в телескопах от зенитного расстояния // Атмосферная оптика. М.: Наука, 1968. С. 23–30.
26. Калистратова М.А. Измерения дрожания края солнечного изображения // Атмосферная оптика. М.: Наука, 1968. С. 12–22.