

УДК 520.3

DOI: 10.53403/9785951504944\_2020\_25.2\_38\_49

# Дневное наблюдение звезд слабой яркости ( $7^m - 8^m$ ) с равнинной местности

С. Г. Гаранин, Л. И. Зыков,  
А. Н. Климов, С. М. Куликов,  
С. П. Смышляев, В. В. Степанов,  
А. Ю. Сяндюков

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

## 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 звезд для возможности осуществления астронавигации [5].

Наблюдение космических объектов на фоне ночного неба даже с помощью небольшого любительского телескопа [6] и видеокамеры с кремниевой фотоприемной матрицей, расположенных на равнинной местности на поверхности Земли, не вызывает трудностей вплоть до слабосветящихся объектов с блеском 9–13 звездной величины. Однако наблюдение тех же объектов той же аппаратурой в дневных условиях вызывает трудности, уже начиная с относительно яркого объекта 3-й звездной величины, которые все более возрастают с уменьшением их яркости. Ухудшение проникающей способности при дневном наблюдении решающим образом связано с высоким фоном дневного неба, а также с большей турбулентностью атмосферы по сравнению с ночными условиями.

Наблюдению звезд и космических объектов в дневных условиях посвящен ряд работ (например [7–11]), в которых для регистрации применялись, как правило, относительно крупные астрономические телескопы, размещенные в условиях с хорошим астроклиматом, характерным для обсерваторий. Ниже описаны результаты дневных наблюдений звезд слабой яркости, осуществленных с помощью телескопа с входной апертурой диаметром 200 мм и фокусным расстоя-

нием 2 м, оснащенного видеокамерой с кремниевой фотоприемной 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 фотоприемной 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 фотоприемной матрицы в пятне изображения звезды;  $I_f$  – количество фотонов в секунду приходящих на пиксел от фона неба рядом с изображением звезды;  $\eta$  [электрон/фотон] – квантовая эффективность фотоприемника;  $t_{\text{exp}}$  [с] – время накопления сигнала (или время экспозиции);  $i_m$  [электрон/с] – темновой ток фотоприемника;  $N_R$  – шум считывания (в электронах);  $\sigma$  – пространственный шум, вызванный неравномерностью чувствительности по поверхности матрицы (в электронах).

Необходимо отметить, что пространственный шум  $\sigma$  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 съемках.

Для условий регистрации звездных объектов на фоне дневного неба собственными шумами матрицы по сравнению с фотонным шумом от неба можно пренебречь, тогда расчетное 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 растет пропорционально корню квадратному из времени экспозиции  $t_{\text{exp}}$ . То есть увеличивая время экспозиции, можно улучшить качество наблюдения звезд малой яркости и соответственно повысить проникающую способность регистрации. Максимальное время экспозиции  $t_{\text{max}}$ , когда приемник еще не достигает порога насыщения от яркого фона неба, определяется глубиной потенциальной ямы  $U$  (в электронах) элементарного фотоприемника 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 фотоприемной матрицы с однократной экспозицией максимально возможной длительности составит

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

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 ее пиксела. С ростом потенциальной ямы будет возрастать отношение сигнал/шум и улучшаться проникающая способность при регистрации слабосветящихся космических объектов.

### ***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)-фотоприемников, так и КМОП (комплиментарный металл-оксидный полупроводник)-фотоприемников. В двух камерах Wat-100N [17] и RT-1000DC [18] использовалась ПЗС-матрица, глубина потенциальной ямы (зарядовая емкость) пиксела составляла соответственно 10 и 170 тыс. электронов. Еще в двух камерах HXG-40NIR [19] и BSA-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 BSA-304. Первая из них имела большую потенциальную яму, что позволяло получить длительную однократную экспозицию при съемке. 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 емкость пиксела до 600 тыс. электронов. Таким образом, при испытаниях зарядовая емкость пиксела фотоприемника изменялась от 10 до 600 тыс. электронов. При съемке камерой BSA-304 применялось 2×2 бинирование пикселей, так что объединенный 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 входной апертуры 200 мм. Телескопы закреплялись неподвижно, с помощью 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 падал 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 легких укрытиях. Высота над уровнем моря, измеренная навигатором Garmin, составляла 150 м. Изображение с видеокамер записывалось 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 – среднеквадратичное отклонение амплитуды фона рядом с ее изображением в области 20×20 пикселей матрицы. Все амплитуды брались в цифровых единицах (ц.е.).

Таблица 1

Параметры видеокамер Wat-100N, HXG-40NIR, RT-1000DC и BSA-304

	Wat-100N	HXG-40NIR	RT-1000DC	BSA-304
Тип и марка матрицы	ПЗС, ICX429ALL	КМОП, CMOSIS CMV-4000	ПЗС, КАI-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, тыс. электронов	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 авторами статьи значение.

✦ 1

✦ 1

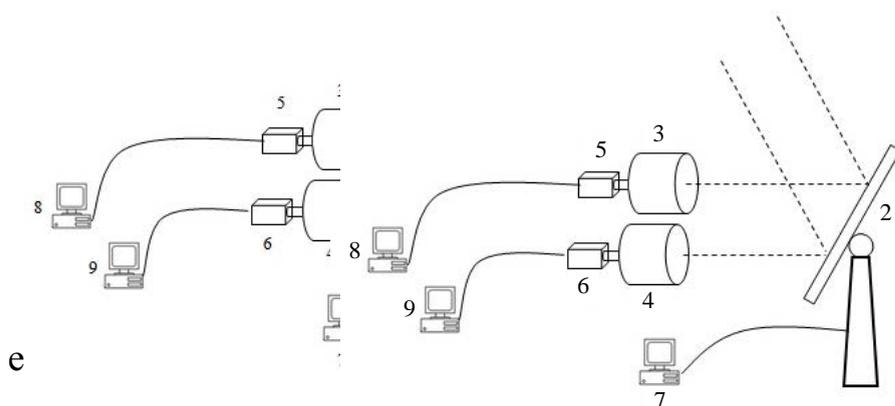


Рис. 1. Оптическая схема наблюдения звезд

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. Съемка 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/м<sup>2</sup>·ср·мкм (о методике ее измерения смотри ниже). Таким образом, условия регистрации были выражено дневными и близкими к полуденным для этого времени года. При съемке 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 использованная зарядовая емкость по отношению фактической амплитуды сигнала к насыщающей.

Проведенные испытания показали (табл. 2), что отношение сигнал/шум растет 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 съемке видеокамерами RT-1000DC и ВСА-304, у которых при экспозиции 40–80 мс насыщения еще не происходит, но заполняется до 94 % потенциальной ямы. Несмотря на то, что съемка проходила при разной яркости неба и это давало разброс в измерениях, хорошо виден рост отношения сигнал/шум при увеличении зарядовой емкости пикселя матрицы. Из табл. 2 видно, что при увеличении зарядовой емкости пикселя от 8 до 510 тыс. электронов, т. е. в 64 раза, отношение сигнал/шум возросло от 13 до 140, т. е. в 10 раз. Отношение сигнал/шум увеличивается приблизительно пропорционально корню квадратному из глубины потенциальной ямы пикселя фотоприемника. Если рассмотреть регистрацию с однократной экспозицией при одной яркости фона неба, например при 60 Вт/м<sup>2</sup>·ср·мкм, то при увеличении зарядовой емкости пикселя от 8 тыс. электронов (камера Wat-100N) до 140 тыс. электронов (камера RT-1000DC), т. е. в 17,5 раз, отношение сигнал/шум возросло от 13 до 40, т. е. 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 ВСА-304 при фоне неба 20 Вт/м<sup>2</sup>·ср·мкм. Здесь при увеличении зарядовой емкости в 3,4 раза – от 160 тыс. электронов (камера RT-1000DC) до 510 тыс. электронов (камера ВСА-304) – отношение сигнал/шум составляет соответственно 140 и 120 и не увеличивается, а даже несколько уменьшается. Причина такого поведения может заключаться в более высоких исходных шумах камеры ВСА-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 ВСА-304 не продемонстрировала лучшего результата регистрации по сравнению с камерой RT-1000DC. Тем не менее, наблюдение Полярной звезды показало, что более высокое отношение сигнал/шум при регистрации звездных объектов может быть получено при использовании видеокамер RT-1000DC и ВСА-304. Первая позволяла получить длительную однократную экспозицию за счет глубокой потенциальной ямы, вторая – длительную экспозицию за счет суммирования исходных, еще не насыщенных фоном неба, кадров. Отметим, что указанные видеокамеры были разработаны и изготовлены в России [18, 20]. Именно эти камеры использовались далее для регистрации звезд слабой яркости.

Таблица 2

Результаты съемки Полярной звезды видеокамерами с разной зарядовой емкостью пиксела

Видеокамера	Яркость фона неба (на $\lambda = 550$ нм), Вт/м <sup>2</sup> ·ср·мкм	Время экспозиции, мс	Использованная зарядовая емкость, 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

### *Оценка яркости неба и турбулентности атмосферы*

Регистрация звезд с блеском  $7^m$  и  $8^m$  на фоне дневного неба проводилась 24, 25 сентября и 1, 14 октября 2015 г. в период с 10:00 часов до 16:00 часов 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 звезд, составляла по азимуту от 0,2 до 359 градусов, по высоте – от 44 до 87 градусов. Поскольку качество дневной визуализации и ее 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 заранее прокалибрована в лабораторных условиях, чувствительность ее фотоприемной 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 звезд слабой яркости находилась в интервале 14–43 Вт/м<sup>2</sup>·ср·мкм (приведена к длине волны 550 нм), что хорошо согласуется с результатами измерений, приведенных 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 звездной величины. Эта звезда имела координаты: высота  $39,7^\circ$ , азимут  $24,5^\circ$  и находилась внутри указанной выше области небосвода, в которой проводилась регистрация звезд слабой яркости. Было обработано 100 кадров изображений звезды, снятых с экспозицией 75 мс видеокамерой RT-1000DC. Найденное среднеквадратическое отклонение центра тяжести от сред-

него значения составило 1,7 угл. секунды (1,3 пиксела матрицы видеокамеры). Эта величина, пересчитанная к направлению на зенит, составляет 1,4 угл. секунды и хорошо согласуется со среднеквадратической величиной дрожания (1–1,5 угл. секунды) 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 угл. секунд. Таким образом, проведенные наблюдения звезд слабой яркости происходили при умеренной яркости дневного неба и хорошо выраженной дневной турбулентности земной атмосферы.

### *Регистрация звезд слабой яркости*

Для регистрации звезд слабой яркости использовались видеокамеры RT-1000DC и ВСА-304, показавшие лучшие результаты при наблюдении Полярной звезды. В табл. 3 приведены условия регистрации звезд слабой яркости (с блеском  $7^m$ – $8^m$ ) на фоне дневного неба. Название звезд, их блеск и классификация спектра взяты из каталога Catalogue of Positions and Proper Motions (PPM). Наблюдение звезд проводилось 24, 25 сентября и 1, 14 октября 2015 г. в период от 9:55 до 16:00 часов местного поясного времени. Звезды регистрировались при высоте Солнца, изменявшейся в диапазоне от  $12^\circ$  до  $29^\circ$ . Угол элонгации, т. е. угловое расстояние от регистрируемой звезды до Солнца, изменялся от  $47^\circ$  до  $113^\circ$ . Спектральная яркость неба в наблюдаемом поле зрения приведена на длине волны 550 нм в энергетических единицах ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$ ) и астрономических единицах (зв. вел./угл.  $\text{с}^2$ ). В условиях наблюдений яркость неба изменялась в диапазоне от 14 до  $43 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$  (от 4,8 до 3,7 зв. вел./угл.  $\text{с}^2$ ), 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 звезд. 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. Съемка звезд 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 съемка 12 звезд яркостью от  $7^m$  до  $8,4^m$ .

Обнаружение и отождествление изображений звезд 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 звезд 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 объемном виде с помощью программы ImageJ. Снимки были записаны при использовании функции вычитания кадра с фоном неба при регистрации в реальном времени.

Таблица 3

Условия регистрации звезд с блеском 7<sup>м</sup>–8<sup>м</sup> 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 <sup>2</sup> -ср.-мкм (зв. вел./угл. с <sup>2</sup> )	Отношение сигнал/шум	
						RT-1000DC	BCA-304
24.09.2015 г., 16:00	Мю-2 Волопаса	7 <sup>м</sup> , K0	16,2; 244,7	59,7	18 (4,62)	4	4,5
25.09.2015 г., 9:55	25 Рыси	7 <sup>м</sup> , K0	28,9; 144,1	72,5	20 (4,5)	5,8	4,4
25.09.2015 г., 15:27	18 Цфея	7 <sup>м</sup> , M2	20; 237,1	113	17 (4,68)	7,8	6,5
1.10.2015 г., 14:37	HR-5184	7 <sup>м</sup> , K0	23,2; 224,4	81,7	17 (4,68)	8	6,5
1.10.2015 г., 14:40	SAO 002460	8 <sup>м</sup> , K0	22,9; 225,2	90,7	17 (4,68)	6,7	5,5
1.10.2015 г., 14:53	SAO 002558	8,4 <sup>м</sup> , G5	21,6; 228,4	86	16 (4,7)	3	2,5
1.10.2015 г., 15:26	SAO 006363	8 <sup>м</sup> , K2	17,8; 236,1	89,1	17 (4,68)	6	4,1
1.10.2015 г., 15:40	SAO 009426	8,3 <sup>м</sup> , F5	16,0; 239,3	95,4	14 (4,84)	5,5	3
14.10.2015 г., 11:27	HR-5184	7 <sup>м</sup> , K0	26,9; 172,8	86,1	17 (4,65)	5,3	6,3
14.10.2015 г., 11:37	25 Рыси	7 <sup>м</sup> , K0	27,0; 175,6	89,3	23 (4,38)	6,7	7,3
14.10.2015 г., 11:50	HR-4953	7,3 <sup>м</sup> , K0	27,1; 179,2	70,0	20 (4,5)	5,6	5,6
14.10.2015 г., 13:27	HR-5180	7,1 <sup>м</sup> , K0	24,0; 205,6	47,0	43 (3,7)	4,7	5
14.10.2015 г., 13:49	28 Большой медведицы	7,1 <sup>м</sup> , F2	22,5; 211,3	81,8	18 (4,64)	4	4,5
14.10.2015 г., 13:57	SAO 043732	8 <sup>м</sup> , K5	21,9; 213,4	61,7	22 (4,39)	5,7	3
14.10.2015 г., 14:29	SAO 002558	8,4 <sup>м</sup> , G5	19,1; 221,3	89,7	16 (4,75)	2,5	2,5
14.10.2015 г., 15:34	Мю-2 Волопаса	7 <sup>м</sup> , K0	12,1; 236,3	54,4	24 (4,34)	4	5

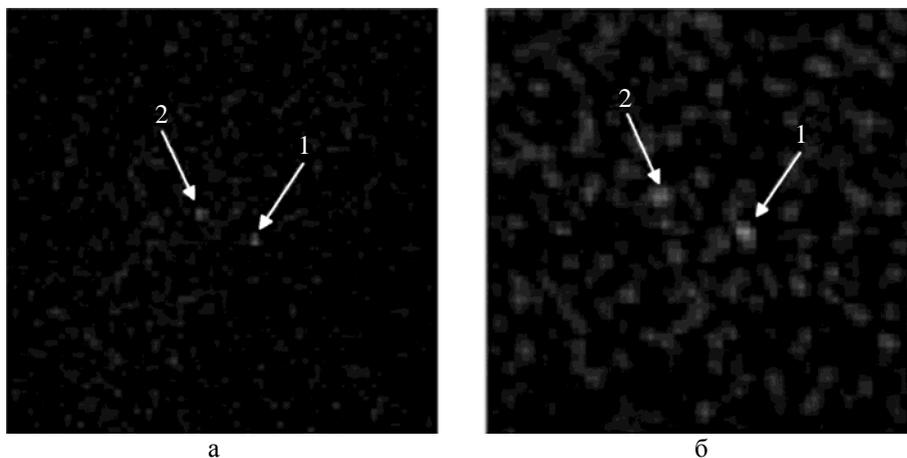


Рис. 2. Снимки звезд слабой яркости. Звезда SAO 002556 (1) с блеском  $6,6^m$  и SAO 002558 (2) с блеском  $8,4^m$  с видеокамеры RT-1000DC (а) и ВСА-304 (б). Время съемки 14:29 ч от 14.10.2015 г. Угловое расстояние между звездами  $0,5$  угл. мин, размер снимка  $3 \times 3$  угл. мин

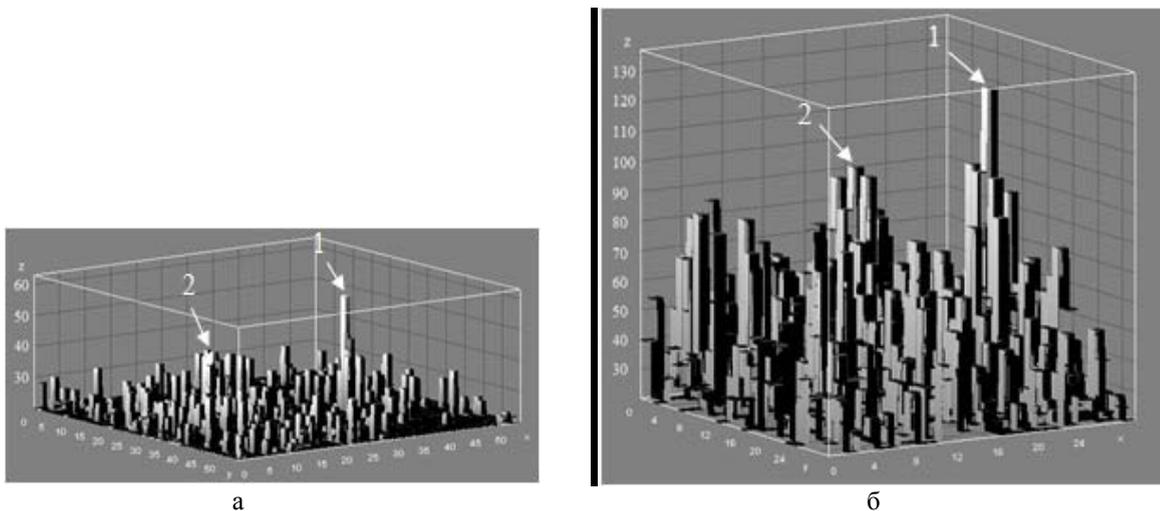


Рис. 3. Пространственное распределение амплитуды на снимках звезд SAO 002556 (1) и SAO 002558 (2), полученных видеокамерой RT-1000DC (а) и ВСА-304 (б). Угловой размер снимка  $1,5$  угл. мин

Обработка снимков с калиброванной камеры RT-1000DC показала, что отношение интегралов в пятнах изображений пар регистрируемых звезд в основном хорошо (не хуже 20 %) согласуется с отношением яркостей в звездных величинах, указанных в каталоге PPM. Исключение составляют отношения интегралов для нескольких пар слабосветящихся звезд. Например, для звезд SAO 002556 с блеском  $6,6^m$  и SAO 002558 с блеском  $8,4^m$  и угловым расстоянием между ними  $0,5$  угл. минуты интегральный сигнал в пятне яркой звезды больше, чем в пятне менее яркой, в 1,7 раза, а из соотношений звездных блесков должен быть в 5 раз больше. Такое несоответствие, вероятно, связано с большой погрешностью определения интеграла изображения, возникающей из-за больших шумов регистрации.

Регистрация звезд малой яркости проходила при максимально возможном времени экспозиции, которое позволяла сделать существующая яркость фона неба и глубина потен-

циальной ямы пиксела фотоприемной матрицы. В проведенных 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 и шумы были больше и составляли соответственно 35–50 ц.е. и 9–18 ц.е. Отношение сигнал/шум для регистрируемых звезд составляло 2,5–8.

Таким образом, для успешной регистрации космических объектов на ярком фоне дневного неба необходимо использовать видеокамеры, обладающие большой зарядовой емкостью пиксела или способные осуществлять суммирование исходных кадров до максимально возможной длительности экспозиции и имеющие низкие пространственные шумы по поверхности матрицы.

### *Заключение*

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

Выбранные после предварительных испытаний видеокамеры – RT-1000DC с зарядовой емкостью 170 тыс. электронов и ВСА-304 с суммированием кадров до эффективной зарядовой емкости 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 звезды слабой яркости  $7^m - 8^m$  при соотношении сигнал/шум 2,5–8.

### *Список литературы*

1. Масевич А. Г. Столкновения в околоземном космическом пространстве (космический мусор) // Сб. научных трудов. – М.: Космосинформ, 1995.
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.
4. Артемьева Н. А., Баканас Е. С., Барабанов С. И. и др. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. – М.: Физматлит, 2013.
5. Авзалов И. З., Бажанов Ю. В., Бакут П. А. и др. Оптико-электронная система для дневного наблюдения космических объектов на фоне звезд // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14, № 12. С. 17–23.
6. Камус С. Ф., Липин Н. А., Сокольский М. Н. и др. 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.

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. et al. NIR Daylight acquisition sensor improves mission capabilities // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5082. P. 1–12.
10. Roggemann M. C., Douglas D., Therikildsen E. et al. Daytime image measurement and reconstruction for space situational awareness application // AMOS 2010, Maui, Hawaii, USA, 14–17 September 2010. P. 172–184.
11. Гришин Е. А., Мелков С. Н., Миловидов В. Л. Инфракрасная камера на основе барьеров Шоттки для дневных наблюдений звезд // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 2. С. 83–86.
12. Новиков С. Б., Овчинников А. А. Предельные возможности получения наземными телескопами изображений астрономических объектов с высоким угловым разрешением // Атмосферная неустойчивость и адаптивный телескоп. – Л.: Наука, 1988. С. 14–17.
13. Евтихеев Н. Н., Краснов В. В., Родин В. Г. и др. Увеличение отношения сигнал–шум за счет пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник РУДН. Сер. 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 // Журнал радиоэлектроники. 2008. № 11. С. 29 [Электронный ресурс]. – <http://jre.clire.ru/jre/nov08/2/text.html>.
15. Зыков Л. И., Лебедев В. А., Смышляев С. П. и др. Оценка проникающей способности визуализации звезд на фоне дневного неба переменной яркости // Сб. докл. IX Всерос. 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.
17. Официальный сайт компании WATEC Co., Ltd. [Electronic resource]. – [http://watec.co.jp/English/e\\_index.html](http://watec.co.jp/English/e_index.html).
18. Цифровая камера RT-1000DC. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – ООО Растр Технолоджи, 2014.
19. Цифровая камера HXG-40NIR. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Baumer Optronic, 2012.
20. Видеокамера с переменной частотой суммирования. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – ЗАО НПК Видеоскан, 2014.
21. Павлов А. В. Опτικο-электронные приборы. – М.: Энергия, 1974.
22. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Пер. с англ. под ред. А. Б. Карасева. – М.: Мир, 1987.
23. Яркость дневного безоблачного неба (экспериментальные данные): справочник. – Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1971.
24. Васильев О. Б. О зависимости дрожания звезд от зенитного расстояния // Оптическая неустойчивость земной атмосферы. – М.: Наука, 1965. С. 40–48.

25. Колчинский И. Г. К вопросу о зависимости дрожания изображений звезд в телескопах от зенитного расстояния // Атмосферная оптика. – М.: Наука, 1968. С. 23–30.
26. Калистратова М. А. Измерения дрожания края солнечного изображения // Там же. С. 12–22.

## **Daylight Observation of Low-Brightness Stars's ( $7^m - 8^m$ ) on Level Terrain**

S. G. Garanin, L. I. Zykov, A. N. Klimov, S. M. Kulikov, S. P. Smyshlyaev,  
V. V. Stepanov, A. Yu. Syundyukov

*This paper presents the results of the recording of stars under daylight conditions using video cameras with a silicon photodetector array. It is shown that the SNR increases as the depth of the potential well of a pixel increases. The RT-1000DC video camera with a potential well of capacity 170 thousand electrons, and the BCA-304 video camera with frame summation up to an effective potential capacity of 600 thousand electrons chosen after preliminary testing, made it possible under conditions of typical daylight turbulence of the atmosphere in the northern hemisphere of the sky to observe low-brightness stars ( $7^m - 8^m$ ) on level terrain.*