

УДК 520.3

Дневное наблюдение звезд слабой яркости (8^m-10^m) и космических объектов видеокамерой с суммированием изображений

© 2020 г. С. Г. ГАРАНИН, АКАДЕМИК РАН; И. В. ЖУКОВ; Л. И. ЗЫКОВ, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК; А. Н. КЛИМОВ; А. В. КОПАЛКИН, КАНД. ФИЗ.-МАТ. НАУК; С. Л. ОПЁНОВ; С. П. СМЫШЛЯЕВ, КАНД. ТЕХН. НАУК; А. Ю. СЮНДЮКОВ

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

E-mail: zikov@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 09.01.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-07-49-59

Приведены результаты регистрации звезд и космических объектов в дневных условиях с использованием видеокамеры с кремниевой фотоприемной матрицей. В камере в реальном времени применены алгоритмы суммирования до 300 кадров видеоизображений и двухточечной коррекции пространственных (геометрических) шумов матрицы. Их применение позволило уменьшить временные и пространственные шумы, повысить проникающую способность визуализации и наблюдать в дневных условиях с равнинной местности в северной полусфере неба звезды и космические объекты слабой яркости с блеском 8^m-10^m .

Ключевые слова: дневное наблюдение звезд и космических объектов, проникающая способность, суммирование кадров, коррекция пространственных шумов.

Коды OCIS: 110.0115, 040.1490

ВВЕДЕНИЕ

Засоренность ближнего космоса искусственными космическими объектами [1–3], опасность столкновения Земли с астероидами [4], звездная астронавигация [5], лазерная связь между Землей и космическим аппаратом [6, 7] обуславливают необходимость осуществления непрерывного круглосуточного наблюдения околоземного космического пространства. Однако, если наблюдение слабосветящихся (с блеском 10^m-14^m) космических объектов (КО) даже с помощью небольшого телескопа (апертурой порядка 10 см) не вызывает трудностей на фоне ночного неба, то приближение к этим результатам в дневных условиях является большой проблемой, которая связана в первую очередь с высокой яркостью

дневного неба [8], а также с повышенной турбулентностью атмосферы.

Одним из приемов улучшения проникающей способности дневной визуализации является увеличение времени экспозиции фотоприемника (ФП). Экспериментально было показано [9], что при регистрации звезды видеокамерой с матричным ФП отношение сигнал/шум растет при увеличении времени экспозиции одиночного кадра как за счет увеличения выдержки отдельного кадра, так и за счет суммирования кадров. Однако получение длинной экспозиции (до 1 с) в одиночном кадре без насыщения приемника требует очень большой зарядовой емкости пиксела фотоприемной матрицы, которая при размере пиксела 10 мкм с телескопом, использованным

в работе [9], и светофильтром КС17 может достигать 0,4–6,4 мегаэлектрон при регистрации на фоне дневного неба яркостью 25–400 Вт/м² ср мкм ([10], длина волны $\lambda = 550$ нм). Суммирование кадров позволяет проводить регистрацию при гораздо меньшей зарядовой емкости пиксела, но тогда необходима высокая частота кадров. Более высокую частоту кадров по сравнению с матрицами ПЗС обеспечивают кремниевые матрицы КМОП.

В данной работе приведены результаты применения видеокамеры на основе матрицы КМОП с суммированием изображений для дневной визуализации звезд и космических объектов. Наблюдения проводились с равнинной местности юга Нижегородской области России.

1. ВИДЕОКАМЕРА С СУММИРОВАНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Суммирование кадров видеоизображений находит применение в астрономических наблюдениях КО на фоне ночного неба. Оно уменьшает шумы на снимках изображений и, как правило, выполняется в компьютере после их видеозаписи (см., например [11]). В описанной ниже дневной астросъемке применялись две разработанные нами видеокамеры — ВОИ-150 и ВОИ-300, работающие с максимальной частотой f кадров 153 и 300 Гц соответственно. В камерах реализовано аппаратное суммирование в реальном времени кадров, поступающих от фотоприемной матрицы. Разработка электронных схем и узлов была выполнена предприятием ООО «Стрим Лабс» (Москва). Функциональная схема управления изображениями в видеокамере приведена на рис. 1.

Исходные кадры с выходов матрицы CMV300 фирмы CMOSIS [12] в цифровом формате пиксела 12 бит (4096 градаций) поступают в устройство суммирования кадров, которое осуществляет аппаратное суммирование единичных кадров без потери младших битов. В процессе суммирования разрядность сигнала с пиксела нарастает и при максимальном суммировании (4095 кадров) может достигать 24 бит. Во встроенном в камеру программном обеспечении предусмотрен выбор одного из двух интервалов времени — 0,25 и 1 с, в течение которых осуществляется суммирование кадров,

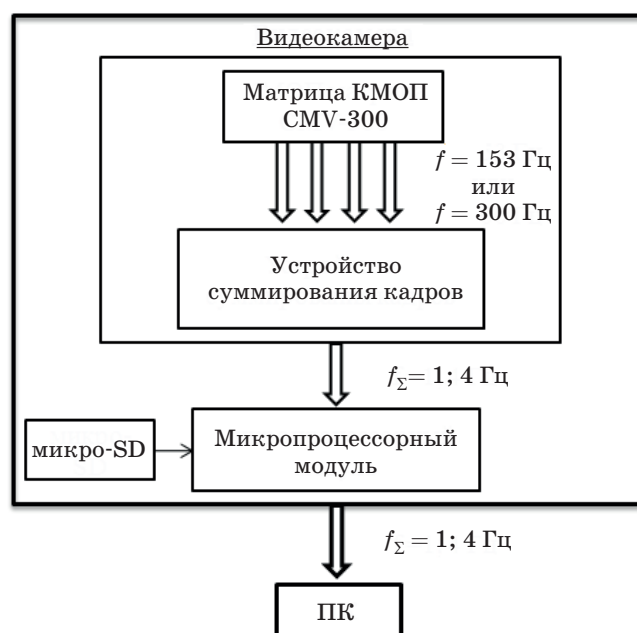


Рис. 1. Функциональная схема управления изображениями в видеокамере. f — частота исходных кадров, f_{Σ} — частота суммированных кадров. ПК — персональный компьютер.

и максимальное время суммарной экспозиции при съемке не превышает этих значений. Максимальное количество градаций амплитуды сигнала в суммированном кадре, которое накопится при использовании камеры ВОИ-300 и выборе интервала суммирования 1 с составит $4096 \times 300 = 1228800$ градаций.

Суммированные кадры передаются в микропроцессорный модуль в формате 32 бит/пиксел, соответствующем типовому для микропроцессора формату представления целого числа без знака. В программе микропроцессора амплитуда суммарного сигнала делится на 16 так, чтобы получить максимальное число градаций яркости $65536 (2^{16})$. Такая операция соответствует получению усредненного суммарного кадра изображения. По заданным алгоритмам выполняется математическая обработка этих кадров, предусматривающая двумерную цифровую фильтрацию, двухточечную коррекцию пространственных шумов, контрастирование и некоторые другие возможности. Под программным контролем и управлением микропроцессора находятся все технические возможности, реализуемые используемой матрицей, сумматором и самим

микропроцессорным модулем. Программное обеспечение, применяемое в испытуемых видеокамерах, было разработано одним из авторов. Имеющаяся в программе алгоритмическая регулировка экспозиции предусматривает 16 положений (ступеней), которые обеспечивают получение одинакового отклика ФП (в цифровых градациях) при изменении яркости неба примерно в 5000 раз. Каждая ступень учитывает три изменяющихся параметра: экспозицию одиночного кадра (от 91 до 124878 мкс), количество суммируемых кадров (от 8 до 300) и аналоговое усиление (от 1 до 3,5). В откорректированном суммарном и усредненном кадрах выделяется полезный яркостной диапазон (от существующего фона неба до максимальной яркости), который преобразуется в разрядность 8 бит/пиксел (256 цифровых градаций). Это изображение отправляется на персональный компьютер по каналу связи Ethernet 100 Мбит/с под управлением транспортного протокола TCP/IP и используется для визуализации изображения на дисплее оператора.

В камере предусмотрена запись кадров изображений на встроенную в нее microSD-карту памяти в одном из двух форматов. В формате AVI с кодировкой MJPEG записываются те же видеокдры (контрастированные, 8 бит/пиксел), которые отправляются в удаленный компьютер для отображения картинки на видеомониторе. Во втором варианте записываются кадры, также прошедшие коррекцию, но без контрастирования и компрессии с цифровой разрядностью 16 бит/пиксел в формате VRC [13]. Записанные в этом формате видеоизображения использовались для количественного анализа амплитуд сигнала, временного и пространственного шумов, отношений сигнала к фону и сигнала к шуму. В изображениях, записанных в формате AVI, при обработке снимков из-за предусмотренной операции вычитания фона можно корректно определять только отношение сигнал/шум.

Для коррекции пространственных шумов использовались два корректора, содержащие матрицы коэффициентов, необходимых для приведения светосигнальной характеристики каждого пиксела к средней по кадру — корректор смещения, записанный при полном затемнении ФП, и корректор чувствительности, связанный с наклоном светосигнальной ха-

рактеристики и записанный в середине ее линейного участка. Корректоры для каждой из 16 ступеней экспозиции записываются заранее при съемке неба разной яркости и хранятся на microSD-карте памяти. В ходе съемки нужные два корректора (смещения и чувствительности) считываются в оперативную память микропроцессорного модуля и применяются для коррекции по методике, описанной в работах [14, 15].

2. УМЕНЬШЕНИЕ ВРЕМЕННОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ШУМОВ ПРИ СУММИРОВАНИИ И КОРРЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Результат примененных в видеокамере преобразований изображений был проверен с помощью видеосъемки фона дневного безоблачного неба и измерения временного и пространственного шумов в зарегистрированных снимках. Регистрация проводилась 15 апреля 2019 г. видеокамерой ВОИ-300, установленной на телеобъектив Рубинар 10/100 с фокусным расстоянием 1 м и входной апертурой 100 мм. Угловое поле составляло $16 \times 12'$. Измерения проводились при яркости фона дневного неба, равной 5 зв. вел./угл. $с^2$, за время 9-ти минутного сеанса наблюдения она оставалась практически постоянной. Время экспозиции одиночного кадра (6,4 мс) устанавливалось так, чтобы амплитуда фонового сигнала с ФП находилась на середине линейного участка и составляла 32000 цифровых градаций (цифровых единиц — ц. ед.) в размерности 16 бит. Число суммированных кадров изменялось от 1 до 512. Видеокдры записывались на microSD-карту камеры в формате VRC. Обработка и измерение временных шумов проводились на участке 10×10 пикселов с использованием программы UNoise, разработанной одним из авторов. Измерение показало, что временной фотонный шум, усредненный по числу снятых кадров, уменьшается (см. рис. 2) при увеличении числа суммированных кадров k в соответствии с расчетной зависимостью [16]

$$N_{ph} = \frac{N_t}{k^{0,5}}, \quad (1)$$

где N_{ph} — световой (фотонный) временной шум после суммирования кадров (ц. ед.), N_t — све-

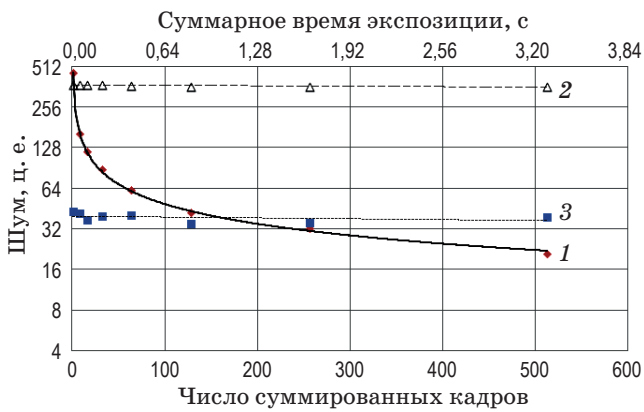


Рис. 2. Зависимости временного фотонного шума (1), пространственного шума до (2) и после (3) коррекции в изображении от числа суммированных кадров.

товой (фотонный) временной шум в исходном одиночном кадре до суммирования (ц. ед.).

Временные шумы определялись по аналитическим выражениям, приведенным в работе [7]. Рисунок 2 показывает, что при суммировании 153 одиночных кадров (суммарное время экспозиции 1 с) временной шум в суммарном усредненном кадре уменьшается в 13 раз по отношению к временному шуму в одиночном кадре.

Для возможности исследования пространственных шумов и эффективности их коррекции на microSD-карте был заранее подготовлен корректор коэффициентов смещения, который записывался при полностью закрытом от света телеобъективе. Корректор чувствительности записывался непосредственно перед съемкой на том же участке неба при той же его яркости, к которому далее и применялся. Время экспозиции при записи корректоров составляло 6,4 мс. Пространственные шумы в суммарном (и усредненном) изображении определялись обработкой видеоснимков с помощью программы UNoise по выражениям из работы [17]. В последовательности из 50 кадров суммарных изображений, записанных до и после применения коррекции, обрабатывались одинаковые участки размером 10×10 пикселей (те же, которые использовались при определении временного шума). Снимки неба после применения коррекции демонстрируют (рис. 3), что подстилающий фон от неба значительно выровнялся, стал гладким, пропали вертикальные полосы, характерные матрицам КМОП.

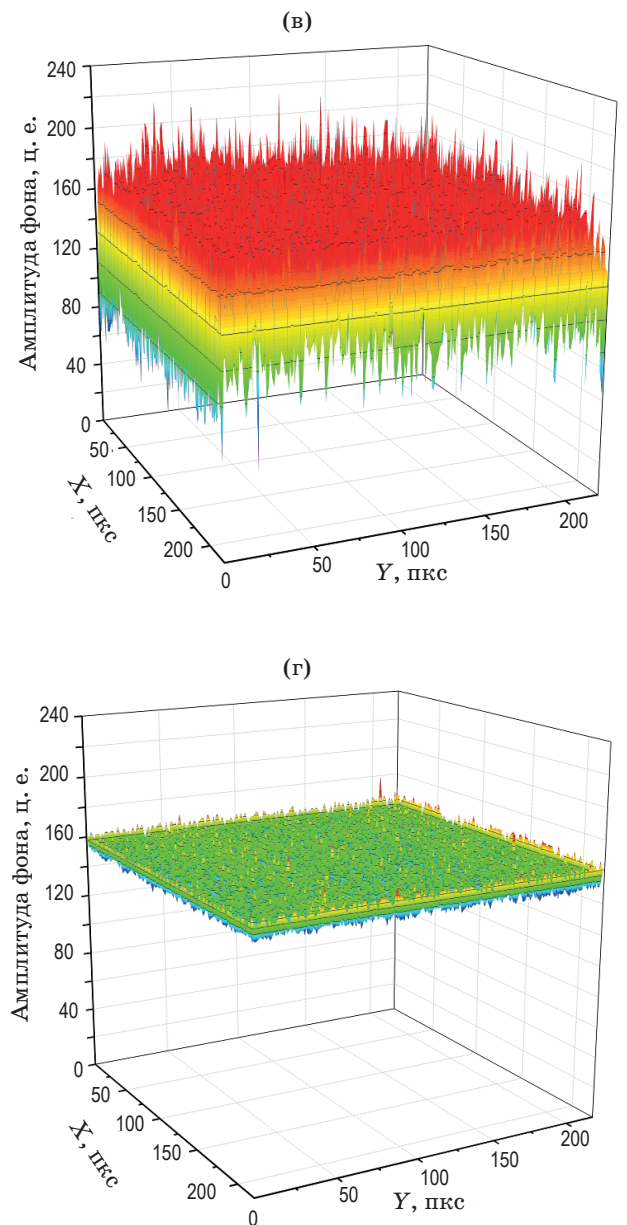
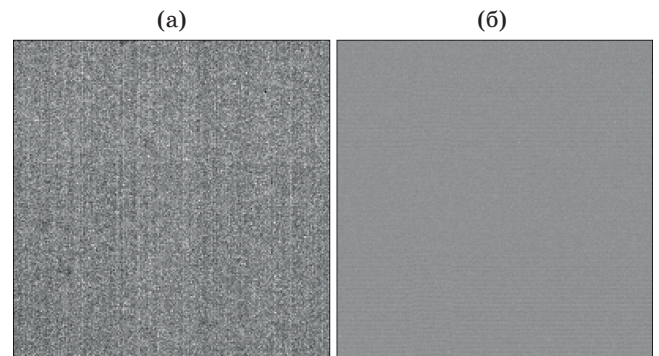


Рис. 3. Снимки дневного безоблачного неба (а, б) и распределение амплитуды в них (в, г), до коррекции (а, в) и после коррекции (б, г) пространственных шумов. Поле зрения $8 \times 8'$.

Пространственный шум как до коррекции, так и после ее применения не зависит от числа суммируемых кадров (рис. 2, кривые 2 и 3), но значительно (до 10 раз) уменьшается при применении корректоров. Видно, что уменьшающийся при суммировании кадров временной шум становится равным скорректированному пространственному шуму (кривые 1 и 3 пересекаются) при времени суммарной экспозиции примерно 1 с. Для сопоставления уровня скорректированных пространственных шумов исследованной видеокамеры с такими же шумами других камер удобней пользоваться неравномерностью чувствительности (*photo response nonuniformity* — PRNU) между пикселями матрицы, которая предусмотрена стандартом [17]. Найденные в соответствии с его требованиями значения PRNU сигнала, равного половине от уровня насыщения, оказались равными $1,1 \pm 0,11\%$ до коррекции и $0,1 \pm 0,02\%$ после нее.

Здесь необходимо отметить, что в проведенных испытаниях корректор чувствительности был получен при амплитуде фона, наиболее близкой к амплитуде фона изображения, к которому он применялся. Поэтому точность коррекции была максимальной. Как показали испытания, при различии этих амплитуд в 1,6–1,8 раза эффективность коррекции в исследуемой камере снижается примерно в 2 раза, а значение PRNU после коррекции повышается до 0,2%.

Улучшение качества визуализации (отношение сигнала к полному шуму) при увеличении времени суммарной экспозиции имеет ограничение. Это можно увидеть из рис. 2. При увеличении времени экспозиции далее момента, когда пересекаются кривые временного и пространственного шумов, отношение сигнал/шум практически не будет возрастать. Из результатов работы [18] можно получить простое соотношение для оценки времени, при котором временной и пространственный шумы станут равны,

$$t_{\Sigma} \approx \frac{1}{p^2 I_{ph}}, \quad (2)$$

где t_{Σ} — суммарное время экспозиции (с), p — неравномерность чувствительности PRNU, I_{ph} — число фотоэлектронов, рожденных в пикселе матрицы от фона неба за время 1 с.

Таблица 1. Основные характеристики видеокамер

Тип и марка матрицы	КМОП, CMV300
Фирма и страна производитель матрицы	CMOSIS, Бельгия
Размер матрицы, мм	4,74×3,55
Число пикселей в матрице	640×480
Размер пиксела, мкм	7,4×7,4
Фактор заполнения пиксела	1
Глубина потенциальной ямы, ke^-	20
Квантовая эффективность на $\lambda = 0,6$ мкм, электрон/фотон	0,55
Чувствительность на $\lambda = 0,53$ мкм, ц. ед./фотон (при 16 бит)	1,6
Темновой ток при температуре 20 °С, электрон/с	125
Шум считывания, электрон	20
Порог чувствительности на $\lambda = 0,532$ мкм, фотон	18
Неравномерность чувствительности, %	
– до коррекции изображения*	1,1
– после коррекции изображения*	0,1–0,2
Число корректирующих изображений	32
Частота исходных кадров, Гц	
– в исполнении ВОИ-150	153
– в исполнении ВОИ-300	300
Время экспозиции одного кадра (диапазон, используемый при алгоритмической регулировке экспозиции)	от 91 мкс до 1/8 с, (13 значений)
Число суммированных кадров за 1 с	от 8 до 300
Частота суммированных кадров, Гц	1, 4
Время суммарной экспозиции (мс) за время съемки в 1 с	27,3–1000
Интерфейс связи	100 Мбит Ethernet
Объем карты памяти	16 Гб

Примечание. * По обработке снимков с фоном дневного безоблачного неба.

Оценка, выполненная по формуле (2) в условиях проведенных исследований ($p \approx 0,1\%$, $I_{ph} = 1,3 \times 10^6$ л/с — небо яркостью 5 зв. вел./угл. с²), дает $t_{\Sigma} \approx 0,8$ с, близкое к полученным экспериментальным результатам.

Для сведения в табл. 1 приведены основные технические характеристики испытанных видеокамер ВОИ-150 и ВОИ-300, включая их шумовые параметры, измеренные авторами пороговая чувствительность и неравномерность чувствительности.

3. ИСПЫТАНИЕ КАМЕРЫ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ

С целью проверки эффекта от суммирования кадров и коррекции пространственных шумов была проведена одновременная дневная регистрация Полярной звезды камерой ВОИ-150 и, для сравнения, камерой типа RT-1000DC, показавшей ранее лучшие результаты по дневной регистрации звезд слабой яркости при времени экспозиции 80 мс [9]. Для наблюдения применялась оптическая схема, изображенная на рис. 4, аналогичная приведенной в работе [9].

Видеокамеры устанавливались на два одинаковых телескопа ТАЛ-200К с фокусным расстоянием 1,7 м и диаметром входной апертуры 200 мм. Телескопы закреплялись непод-

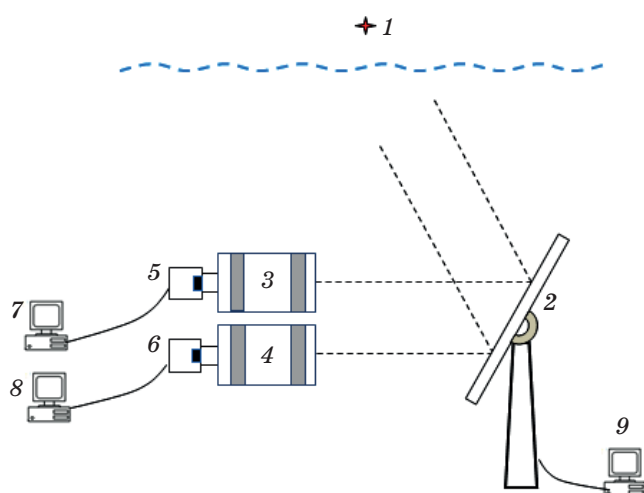


Рис. 4. Оптическая схема наблюдения звезд. Свет от звезды — 1, зеркало на опорно-поворотном устройстве — 2, телескопы ТАЛ-200К — 3 и 4, испытываемая видеокамера — 5, камера сравнения — 6, компьютеры для записи видеоизображений — 7 и 8, компьютер, управляющий опорно-поворотным устройством зеркала — 9.

вижно, их оптические оси устанавливались параллельно. Свет от звезды после отражения от зеркала диаметром 760 мм с алюминиевым отражающим покрытием и прохождения телескопов попадал на матрицы испытываемой видеокамеры и камеры сравнения. Зеркало было закреплено на опорно-поворотном устройстве, управление движением которого осуществлялось с помощью компьютера 9. Перед матрицами видеокамер устанавливался красный светофильтр КС17 для выделения спектральной области 0,67–1 мкм с целью улучшения контраста изображения. Телескопы и опорно-поворотное устройство были установлены на бетонной поверхности в легких переносных укрытиях. В сеансах наблюдений на компьютеры 7 и 8 записывалось по 50 кадров видеоизображений с каждой камеры в цифровом формате 16 бит. Их обработка проводилась с помощью программы ImageJ. Количественно определялись амплитуды сигнала, фона, шума и отношение сигнал/шум. 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 50×50 пикселей матрицы.

Регистрация проходила 24 мая 2017 г. в 15:20 час местного поясного времени, высота Солнца составляла 40°, угловое расстояние от него до Полярной звезды — 68°. Во время съемки на небе присутствовали кучевые облака, между ними — слабо выраженные слоистые облака и дымка. Съемка проводилась в моменты разрыва между кучевыми облаками. Яркость неба, измеренная камерой RT-1000DC, способом, описанным в публикации [9], составляла 30 Вт/м² ср мкм на $\lambda = 550$ нм. На камере RT-1000DC устанавливалось время экспозиции одного кадра 65 мс, при котором еще не было насыщения сигнала. На испытываемой камере ВОИ-150 при экспозиции одного кадра в течение 6,4 мс и суммировании 153 кадров суммарная экспозиция составляла 1 с. Корректор чувствительности записывался непосредственно перед съемкой звезды на фоне неба вблизи звезды, а корректор смещения был записан заранее при закрытой непрозрачной для света крышке апертуре телескопа.

Регистрация показала (табл. 2), что в изображениях с испытываемой камерой ВОИ-150 по сравнению с камерой сравнения RT-1000DC

Таблица 2. Результаты регистрации Полярной звезды

Видеокамера	Угловое поле, угл. мин	Время экспозиции, мс	Временной шум, ц. ед.	PRNU, %	Отношение сигнал/шум
RT-1000DC	26,5×26,5	65	11,5	0,23	40
ВОИ-150	9,6×7,2	995	1,6	0,1	98

наблюдаются в 2,3 раза меньшая PRNU и в 2,5 раза большее отношение сигнала к полному шуму.

Временной шум в изображении с испытуемой камерой также был меньше примерно в 7 раз, чем в изображении с камеры RT-1000DC.

Таким образом, реализованное в испытуемой видеокамере ВОИ-150 суммирование изображений, давшее возможность увеличить время экспозиции, и примененная двухточечная коррекция пространственных шумов привели к росту отношения сигнал/шум в 2,5 раза, что должно привести к улучшению проникающей способности дневной визуализации на одну звездную величину по сравнению с видеокамерой сравнения RT-1000DC с однократной экспозицией.

4. НАБЛЮДЕНИЕ ЗВЕЗД СЛАБОЙ ЯРКОСТИ (8^m-10^m)

Наблюдение звезд слабой яркости осуществлялось по схеме, приведенной на рис. 4, однако в ней для регистрации использовался только один телескоп ТАЛ-250К с входной апертурой диаметром 250 мм, фокусным расстоянием 2,1 или 1,5 м. Меньшее фокусное расстояние достигалось постановкой в оптический тракт телескопа редуктора (объектива с фокусным расстоянием 0,4 м). На телескоп устанавливались испытуемые видеокамеры ВОИ-150 или ВОИ-300. Остальные параметры схемы оставались прежними. Съёмки звезд проводились 20 и 28 июня, 28 августа, 30 сентября и 1 октября 2018 г. в период с 13:40 до 17:00 час местного поясного времени. Во все дни регистрации на небе была слабая дымка, а 1 октября присутствовали слоистые облака.

В табл. 3 приведены основные условия и результаты регистрации. Название наблюдаемых звезд, их блеск и классификация спектра взяты из каталога *Catalogue of Positions and Proper Motions*. Звезды регистрировались в северо-восточной полусфере при высоте Солнца

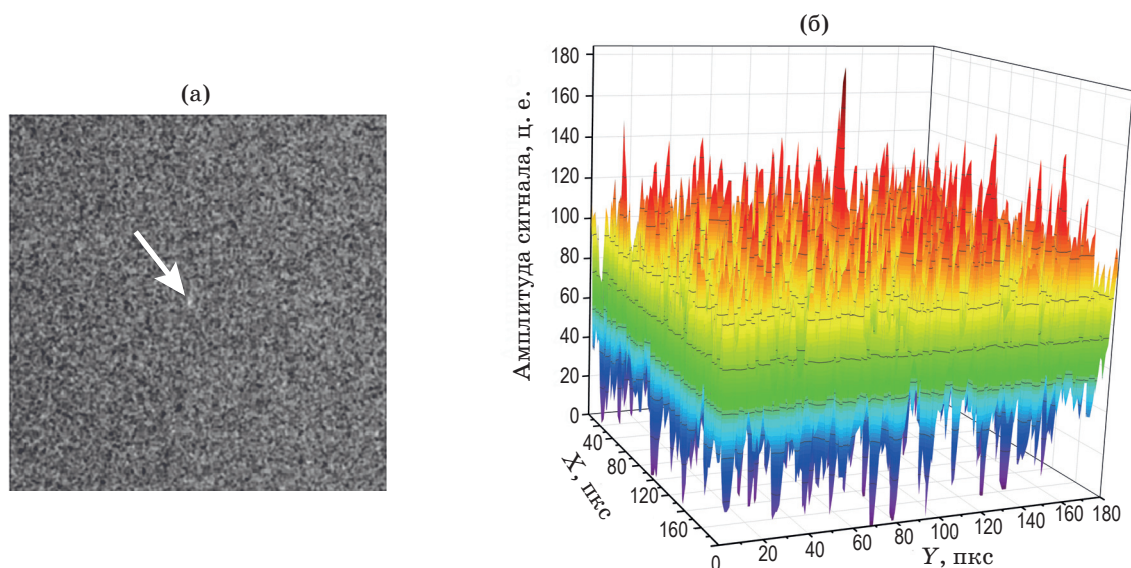
от 5,5 до 41°. Угловое расстояние от регистрируемой звезды до Солнца изменялось от 70 до 128°. Яркость дневного неба измерялась заранее прокалиброванными испытуемыми видеокамерами по методике, описанной в работе [9]. Измеренная спектральная яркость неба (на $\lambda = 550$ нм) во время регистрации находилась в интервале 10–54 Вт/м² ср мкм (5,4–3,5 зв. вел./угл. с²). Изображение записывалось в цифровом формате AVI с глубиной оцифровки 8 бит.

Всего было зарегистрировано 14 звезд яркостью от 7,8^m до 10^m в основном спектрального класса G5 (желтый цвет). Самая слабосветящаяся 10^m зарегистрированная звезда SAO 047377 была класса K0 (оранжевая), и лучшая проникающая способность видеокамеры объясняется большей спектральной чувствительностью ее матрицы в красной области спектра. Угловой размер $\beta_{0,5}$ изображения звезд по уровню 0,5 от максимума изменялся от 5 до 7,3" и примерно равнялся такому же параметру при регистрации, описанной в публикации [9]. Такой угловой размер указывает на хорошо развитую турбулентность дневной атмосферы в ходе проводимых наблюдений. По проведенной оценке ($r_0 = 2,44\lambda/\beta_{0,5}$) [18, 19] эта турбулентность соответствует радиусу r_0 атмосферной когерентности (радиусу Фрида), равному 5–7 см при средней длине волны 0,76 мкм спектрального диапазона регистрации.

При времени экспозиции одиночного кадра 6,4–31 мс число суммированных кадров изменялось от 32 до 153, частота исходных «быстрых» кадров — от 32 до 153 кадров в секунду. Интегральное время экспозиции суммарного кадра изменялось от 208 до 1000 мс. Корректоры чувствительности записывались непосредственно перед зачетной регистрацией вблизи звезды при фоне неба, минимально отличающемся от фона в кадре со звездой. Отношение сигнала к полному шуму, приведенное в табл. 3, для регистрируемых звезд составляло от 2,5 до 5. При таком отношении

Таблица 3. Условия и результаты регистрации звезд с блеском 8^m-10^m на фоне дневного неба

Тип видеокамеры	Фокусное расстояние телескопа, м	Дата и время регистрации	Название звезды	Блеск, класс и цвет	Время суммарной экспозиции, с	Яркость неба $Вт/м^2$ ср $мкм$ (зв. вел/угл. $с^2$)	Отношение сигнал/шум
ВОИ-150	2,1	20.06.18 г., 17:09	SAO 029983	$7,8^m$, G5, желт	1	32 (4,1)	5
	2,1	28.06.18 г., 15:40	SAO 029983	$7,8^m$, G5, желт	0,21	42 (3,8)	4
	2,1	28.08.18 г., 13:46	SAO 010045	8^m , G5, желт	1	54 (3,5)	2,5
	2,1	28.08.18 г., 14:15	SAO 029983	$7,8^m$, G5, желт	1	48 (3,63)	4,6
	2,1	28.08.18 г., 14:20	SAO 046152	8^m , G5, желт	1	46 (3,7)	5,5
	2,1	28.08.18 г., 14:24	SAO 02558	$8,4^m$, G5, желт	1	50 (3,6)	3
ВОИ-300	1,5	30.09.18 г., 17:00	SAO 052407	$8,3^m$, G5, желт	1	14 (4,94)	4
	1,5	30.09.18 г., 17:02	SAO 048736	$8,8^m$, G5, желт	1	10 (5,4)	4
	1,5	30.09.18 г., 17:03	SAO 048744	$9,1^m$, G5, желт	1	10 (5,4)	4
	1,5	1.10.18 г., 14:36	SAO 046152	8^m , G5, желт	1	19 (4,6)	3,7
	1,5	1.10.18 г., 15:06	SAO 048744	$9,1^m$, G5, желт	1	17 (4,8)	3,6
	1,5	1.10.18 г., 15:22	SAO 048736	$8,8^m$, G5, желт	1	17 (4,8)	4
	1,5	1.10.18 г., 15:28	SAO 088097	$8,9^m$, G0, желт	1	19 (4,6)	5,2
	1,5	1.10.18 г., 15:58	SAO 047377	10^m , K0, оранж	1	10 (5,4)	3,1

Рис. 5. Фрагмент снимка звезды SAO 047377 с блеском 10^m в угловом поле $5 \times 5'$ (а) и пространственное распределение амплитуды сигнала в угловом поле $3 \times 3'$ (б).

сигнал/шум изображение одиночного объекта на шумовом поле видеоснимка еще может распознаваться оператором [20].

Характерный снимок звезды SAO 047377 с блеском 10^m приведен на рис. 5, выполненный камерой ВОИ-300 при суммарной экспозиции 1 с.

Пространственное распределение амплитуды сигнала, изображенное на рис. 5б, получено в объемном виде с помощью программы Origin. Отношение максимальной амплитуды сигнала к окружающему фону неба изображения этой звезды составляло около 1% (расчетная оценка), отношение сигнал/полный шум — 3,1. Остаточное значение пространственного шума после его коррекции в проведенных съемках звезд составляло 11–39 ц. ед. (PRNU = 0,15–0,3%), временной шум — 11–23 ц. ед., а максимальная амплитуда в изображении звезды на снимке изменялась в диапазоне 85–160 ц. ед. (при разрядности 8 бит).

5. НАБЛЮДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Наблюдению КО в дневных условиях посвящены работы [21, 22]. Для их регистрации применялись относительно крупные астрономические телескопы с приемной апертурой диаметром до 1,6 м, расположенные в обсерваториях с хорошим астроклиматом (штат Нью-Мексико и остров Мауи, Гавайские острова). Были зарегистрированы низкоорбитальные искусственные спутники Земли с блеском до 9^m .

В проведенных нами испытаниях наблюдение КО осуществлялось по прежней схеме, приведенной на рис. 4, в которой был использован один телескоп ТАЛ-250К с фокусным расстоянием 2,13 или 1,5 м. Наблюдения КО осуществлялись при их сопровождении в ходе полета, при этом в поле зрения камеры КО был подобен неподвижной звезде. Управление опорно-поворотным устройством с зеркалом (рис. 4) выполнялось с использованием орбитальных данных выбранных КО в формате TLE, находящихся в открытом доступе [23].

Наблюдения КО проводились 12 июля, 29 августа и 11 октября 2018 г. в период от 10:30 до 16:00 часов местного поясного времени. Во время регистрации 12 июля на небе

присутствовали кучевые облака, между ними — слабо выраженные слоистые облака и дымка. Состояние неба 29 августа: визуально вся небесная сфера была без облаков, присутствовала слабая дымка. 11 октября небо было со слабой дымкой и слоистыми высотными облаками.

Были осуществлены наблюдения восьми КО (нефункционирующие космические аппараты, последние ступени ракет-носителей) с блеском от $7,6^m$ до 9^m . Блеск определялся на основе данных работ [24–28]. Эффективная площадь рассеяния наблюдаемых КО, взятая из публикации [29], составляла 1–5 м². Космические объекты регистрировались при высоте Солнца, изменявшейся в диапазоне от 25 до 57°. Угол элонгации изменялся от 26 до 132°. Дальность до регистрируемых КО варьировалась от 626 до 2150 км. Яркость дневного неба в ходе наблюдений изменялась от 16 до 79 Вт/м² ср мкм (от 4,9 до 3,1 зв. вел./угл. с²).

Космические объекты наблюдались при их сопровождении на некотором отрезке траектории, когда еще не мешали облака, время сопровождения составляло десятки секунд. Сопровождение объектов в ходе регистрации было достаточно точным, поэтому их изображения на матрице видеокамеры оставались почти неподвижными за время экспозиции суммарного кадра, составляющее 0,2–1 с. Угловой размер КО по уровню 0,5 от максимума изменялся в ходе сеансов наблюдений от 34 до 53 мкрад (7–11"). Типичный снимок КО и распределение сигнала в изображении представлены на рис. 6.

После применения алгоритмов, предусмотренных в видеокамерах, остаточные шумы в изображениях составили: временной шум 7–22 ц. ед., пространственный шум 10–25 ц. ед. (PRNU = 0,11–0,19%). Максимальная амплитуда сигнала в пятне изображения соответствовала 85–150 ц. ед. Отношение сигнал/полный шум, зафиксированное при регистрации КО, варьировалось в диапазоне от 3,4 до 7,2.

Проведенные испытания показали, что разработанные видеокамеры с суммированием изображений и большим (до 1 с) временем экспозиции могут быть применены в дневных условиях для наблюдения и сопровождения КО яркостью до 9-й звездной величины при дальности от 600 до 2000 км. За счет внедренных в камеру обработок изображения (сумми-

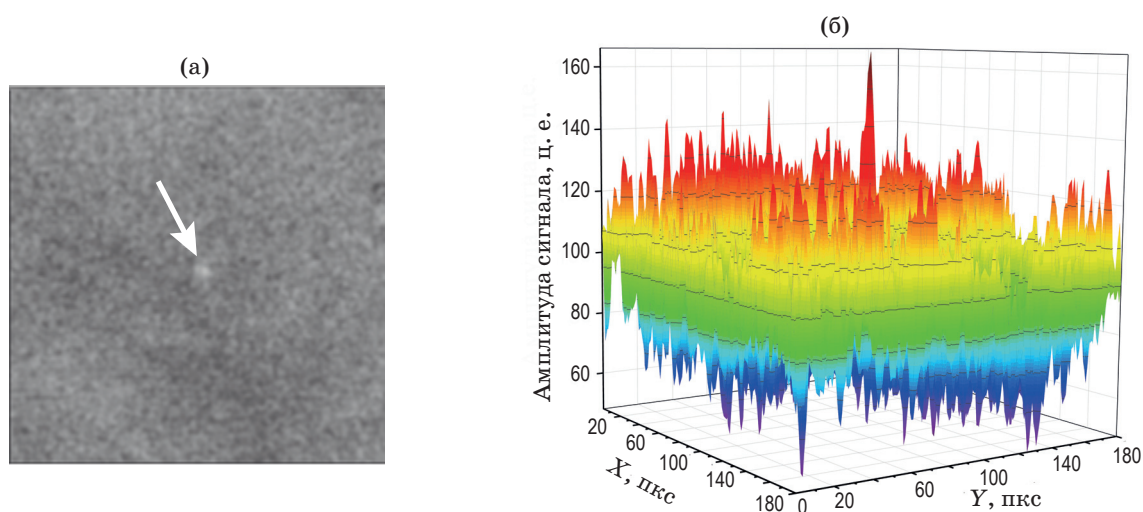


Рис. 6. Типичный снимок КО с блеском 9^m (а) и пространственное распределение амплитуды сигнала (б) в угловом поле $3 \times 3'$.

рование кадров, компенсация пространственных шумов, контрастирование изображения) и увеличения времени экспозиции удается выделять и наблюдать на видеоснимках слабоконтрастные изображения КО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение видеокамер с суммированием изображений при визуализации космических объектов на фоне дневного неба позволило достичь большого времени экспозиции (до 1 с) без перехода фотоприемника в насыщение. По-

лученное при усреднении кадров видеосъемки уменьшение временных шумов (до 13 раз), а также уменьшение за счет применения коррекции пространственных шумов (до 10 раз) позволили улучшить проникающую способность визуализации на одну звездную величину по сравнению с результатами, описанными в работе [9]. Благодаря опциям, заложенным в архитектуру и программное обеспечение разработанных видеокамер, удалось наблюдать звезды слабой яркости 8^m – 10^m и космические объекты с блеском до 9^m при фоновой яркости дневного неба $3,1$ – $5,4$ зв. вел./угл. c^2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыхлова Л.В., Бахтигараев Н.С. Новые проблемы околоземной астрономии // Сб. тр. конф. «Околоземная астрономия-2009». М., 2010. С. 9–15.
2. Масевич А.Г. Проблема загрязнения космоса (космический мусор) // Сб. научн. тр. М.: Космосинформ, 1993. 150 с.
3. Свиридов К.Н., Белкин Н.Д. Наземная космическая система для контроля космического мусора // Конверсия в машиностроении. 1997. № 3. С. 36.
4. Артемьева Н.А., Баканас Е.С., Барабанов С.И. и др. 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., Бакут П.А., Березенцев М.Ю., Карпов А.Н., Мальшева З.М., Шаргородский В.Д., Шумилов Ю.П. Оптико-электронная система для дневного наблюдения космических объектов на фоне звезд // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14. № 12. С. 17–23.
6. Hamid Hemmati. Near-earth laser communications. CRC Press, 2008. 390 p.
7. Российский космический эксперимент «Система лазерной связи», 2013 г. Интернет страница <https://vrk.name/news/97641>
8. 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.

9. *Гаранин С.Г., Зыков Л.И., Климов А.Н., Куликов С.М., Смышляев С.П., Степанов В.В., Сюндюков А.Ю.* Дневное наблюдение звезд слабой яркости (7^m-8^m) с равнинной местности // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 12. С. 30–37.
10. Яркость дневного безоблачного неба (экспериментальные данные). Справочник. Л.: Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, 1971. 164 с.
11. *Копачкая Е.Н., Ларионов В.М.* Фотометрические и поляриметрические наблюдения с ПЗС-камерой на телескопах LX200 и АЗТ-8. Учебно-метод. пособие. СПб, 2007. 27 с.
12. КМОП матрица CMOSIS CMV300. Техническое описание, 2014.
13. Цифровая камера RT-1000DC. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2014.
14. *Кремис И.И., Толмачев Д.А.* Коррекция остаточной неоднородности изображения в тепловизорах второго поколения на основе частотного разложения // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 109–115.
15. *Брондз Д.С., Харитонова Е.Н.* Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-го порядка // Радиоэлектроника. 2008. № 11. С. 29.
16. *Евтихьев 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. Сер. Математика. Информатика. Физика. 2012. № 4. С. 122–136.
17. EMVA Standard 1288. Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras. Release 3.0. November 29, 2010. Issued by European Machine Vision Association.
18. *Татарский В.Л.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: изд. «Наука», 1967.
19. *Шанин О.И.* Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М.: Техносфера, 2013.
20. *Зыков Л.И., Лебедев В.А., Смышляев С.П., Степанов В.В., Сюндюков А.Ю.* Оценка проникающей способности визуализации звёзд 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.
21. *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.
22. *Nelson J.E.* Infrared methods for daylight acquisition of LEO satellites // Thesis. Air Force Institute of Technology, Ohio, 2004. P. 128.
23. Орбитальные данные ИСЗ // интернет страница [www. Celestrack.com](http://www.Celestrack.com)
24. База данных ИСЗ // интернет страница www. Astroguard.ru
25. Интернет страница www. Prismnet.com/mmccants
26. База данных ИСЗ из программы Heavensat // интернет страница www. Sat.belastro.net/heavensat.ru
27. База данных ИСЗ из программы Orbitron // интернет страница www. Stoff.pl
28. *Краснорылов И.И., Плахов Ю.В.* Основы космической геодезии. М.: изд. «Недра», 1976. 216 с.
29. Интернет страница www. CalSky.com