

СРАВНЕНИЕ КРЕМНИЕВОЙ И InGaAs ВИДЕОКАМЕР ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДНЕВНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЗВЕЗД

Л. И. Зыков, А. Н. Климов, С. П. Смышляев, А. Ю. Сюндюков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В последние годы в связи с засорением космоса нефункционирующими искусственными спутниками Земли и их фрагментами, так называемым «космическим мусором» [1–3], и наличием астероидной опасности [2–4], проблема наблюдения космического пространства приобрела особую актуальность как с позиций защиты от столкновения с «космическим мусором», так и с позиций экологической безопасности. Для контроля обстановки в ближнем космосе желательно стремиться к круглосуточному его наблюдению. Это необходимо сегодня также и для осуществления астронавигации по звездам [5]. И если в ночных условиях можно наблюдать слабосветящиеся звезды 8–13 звездной величины, то днем наблюдение, начиная с 3-й звездной величины, вызывает уже трудности, все более возрастающие с уменьшением яркости объекта. Для осуществления дневной визуализации необходим оптимальный выбор матричного фотоприемника. В исследованиях по дневной визуализации звезд применялись видеокамеры как с кремниевой фотоприемной матрицей [6, 7], так и с индий-галлий-арсенидовой матрицей [5, 8, 9]. Для регистрации применялись относительно крупные астрономические телескопы, размещенные в условиях с хорошим астроклиматом, характерным для обсерваторий. В работе [10] для дневной регистрации исследовались кремниевые видеокамеры с разной величиной зарядовой емкости пикселя фотоприемной матрицы при регистрации звезд с равнинной местности.

В данной работе сообщаются результаты сравнительного испытания InGaAs и кремниевой видеокамер, которое было проведено в ходе дневной регистрации Полярной звезды. Целью работы являлось определить, какая камера обеспечивает более высокое отношение сигнал-шум, то есть лучшее качество визуализации звезды в дневных условиях.

1. Характеристики видеокамер

В проведенных испытаниях использовалась видеокамера с кремниевой фотоприемной матрицей и видеокамера с InGaAs фотоприемной матрицей. Основные технические характеристики испытанных видеокамер приведены в таблице. В качестве кремниевой камеры использовалась видеокамера RT-1000DC (разработана в ООО Растр Технолоджи, г. Москва) с матрицей, выполненной на основе ПЗС (приборы с зарядовой связью) технологии. Эта камера показала хорошие результаты при дневной регистрации, описанной в [10], она имела спектральную чувствительность в диапазоне от 0,4 до 1 мкм и обладала малыми шумами. В качестве InGaAs камеры использовалась видеокамера VS320 со спектральной чувствительностью в диапазоне от 0,8 до 1,7 мкм, ее временно нам предоставила фирма изготовитель ООО «НПК Фотоника», г. С.-Петербург. Как видно из рис. 1, InGaAs видеокамера имеет по сравнению с кремниевой более высокую квантовую эффективность, достигающую 0,8 электрон/фотон по сравнению с 0,5 электрон/фотон у кремниевой камеры и примерно вдвое более широкую полосу чувствительности. Такая ситуация выглядит благоприятной для применения InGaAs камер в дневной визуализации звезд, если не учитывать шумы. И как видно из таблицы испытанная InGaAs камера имеет шум связанный с темновым током и считывания заряда больший по сравнению с кремниевой камерой.

	RT-1000DC	VS320 (InGaAs)
Тип и марка матрицы	ПЗС, KAI-1003M	FPA-320×256-C
Размер матрицы, мм	13,1×13,1	9,6×7,68
Размер пикселя, мкм	12,8×12,8	30×30
Диапазон спектральной чувствительности, мкм	0,4–0,9	0,9–1,7
Глубина потенциальной ямы, ke^-	170	High gain: 170 ke^- Low gain: 3,5 Me^-
Интегральная чувствительность, цифр един/фотон	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$7,26 \cdot 10^{-4}$
Неравномерность чувствительности (PRNU) ²⁾ , %	0,26	2 ¹⁾
Время экспозиции, мс	0,3–10000, шаг 1 мкс	0,02–1000, шаг 1 мкс
Частота исходных кадров, Гц	25	До 100
Квантовая эффективность, электрон/фотон	0,48 на длине волны 0,51 мкм	0,7 на длине волны 1–1,6 мкм
Темновой ток, электрон/сек	2500	$2,5 \cdot 10^6$
Шум считывания, электрон	40	200
Формат сигнала	Цифровой CoaXpress, 8 и 12 бит	Цифровой Base CameraLink, 16 бит
Страна производитель, фирма	Россия, Растр Технолоджи	Россия, КБ Вита

¹⁾ Приведено для режима коррекции столбцов из наших измерений, см. ниже. Паспортное значение этой величины дается равным 10 %.

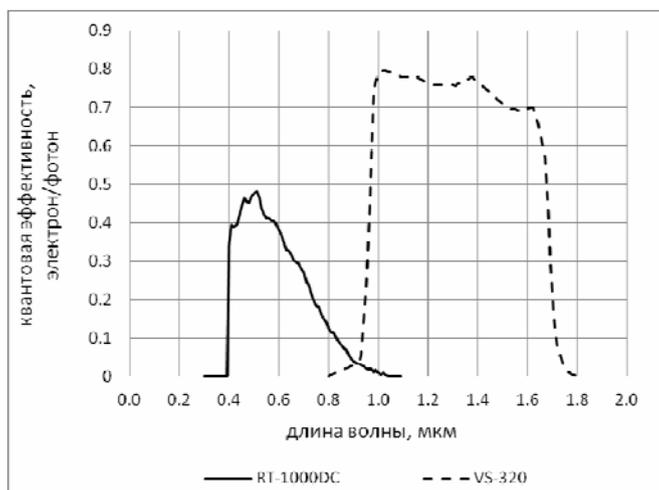


Рис. 1. Зависимость квантовой эффективности Si видеокамеры RT-1000DC и InGaAs видеокамеры VS320 от длины волны

Для многоэлементных фотоприемных матриц, которые применяются в видеокамерах, различают временной и пространственный шум [11–13]. В дневной визуализации звезд на фоне яркого

неба важным является пространственный шум, возникающий из-за неравномерности чувствительности между элементарными фотоприемниками матрицы (Photo response nonuniformity – PRNU [11,12]). При использовании кремниевой видеокамеры с большой зарядовой емкостью пикселя матрицы и реализации в ходе регистрации длительной экспозиции (но не достигая еще насыщения) именно этот шум становился определяющей преградой на пути обнаружения все более слабосветящихся звезд при дневной их визуализации [10].

2. Экспериментальное определение временного и пространственного шумов

При дневной визуализации на фотоприемную матрицу видеокамеры, расположенную в фокальной плоскости телескопа, падает интенсивный свет от светящегося неба. В таких условиях фотонный шум намного (в 10–100 раз для кремниевых камер) превышает собственный временной шум фотоприемника. Временной фотонный шум представляет собой двухполярную флюктуацию сигнала в каждом пикселе фотоприемной матрицы в ходе экспозиции, вызванную случайным характером процесса регистрации фотонов. Согласно [12] он может быть выражен формулой:

$$N_t = \sqrt{I \cdot q \cdot k} \quad (1)$$

где N_t – временной шум в цифровых единицах, I – интенсивность фотонов от фона неба на площадь пикселя фотоприемной матрицы (фотон/мкм²), q – площадь пикселя (мкм²), k – интегральная чувствительность видеокамеры (цифр.един. · пкс/фотон).

Пространственный шум по своему поведению отличается от временного шума и выражен в виде неравномерности чувствительности (PRNU) между пикселями фотоприемной матрицы. Неравномерность чувствительности вызывает различную амплитуду сигнала между пикселями при освещении их равномерным световым потоком. Этот шум имеет технологическую природу и назван шумом, пожалуй, несколько условно. Также в соответствии с [12] он может быть записан:

$$N_s = p \cdot I \cdot q \cdot k \quad (2)$$

где N_s – пространственный шум в цифровых единицах, p – неравномерность чувствительности между пикселями фотоприемной матрицы (PRNU) в относительных единицах.

Экспериментальное определение шумов проводилось по регистрации реального безоблачного дневного неба. Матрицы исследуемых камер поочередно помещались в фокальную плоскость телескопа Meade фокусным расстоянием 2 м и апертурой 200 мм. Проводилась съемка участка неба вблизи Полярной звезды. При регистрации шумов камеры RT-1000DC интенсивность светового потока на матрице менялась по мере потемнения неба при переходе от дня к ночи, время экспозиции составляло 70 мс и оставалось неизменным. При испытании камеры VS-320 съемка велась практически при неизменном свечении неба, но менялось время экспозиции от 10 мс до 250 мс. Амплитуды сигнала и шумы определялись при обработке снимка с помощью программы ImageJ. Для определения светового потока падающего на матрицы исследуемых камер использовались значения интегральной чувствительности, которые были заранее измерены в лабораторных условиях и составляли $7,6 \cdot 10^{-3}$ цифр.един. · пкс/фотон для камеры RT-1000DC и $7,26 \cdot 10^{-4}$ цифр.един. · пкс/фотон для камеры VS-320 при разбивке амплитуды на 2¹² цифровых градаций.

Обработке подвергался участок размером 10×10 пикселей, свободный от дефектов пикселей. Временной шум находился как среднеквадратичное отклонение от среднего в одном текущем пикселе матрицы по 100 кадрам изображений, а пространственный как среднеквадратичное отклонение от среднего в усредненной пространственной области 10×10 пикселей. При этом использовались аналитические выражения, приведенные в работах [11, 13].

На рис. 2 приведены графики временных, а на рис. 3 пространственных шумов испытанных видеокамер RT-1000DC и VS-320 в зависимости от интенсивности фонового излучения. Шум на рисунках, приведен в цифровых единицах в разрядности 12 бит на пиксель (4096 градаций). Интенсивность фонового излучения изменялась от темновой (при закрытой крышке видеокамеры), до на-

сыщающей интенсивности. Как видно из рисунков, насыщение у видеокамеры RT-1000DC происходит при интенсивности 3000 фотонов/мкм², у видеокамеры VS-320 при 6500 фотонов/мкм².

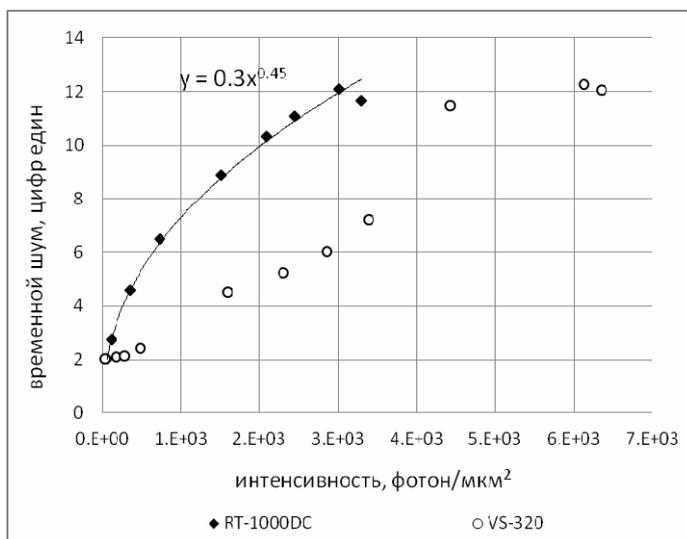


Рис. 2. Временные шумы видеокамер RT-1000DC и VS-320

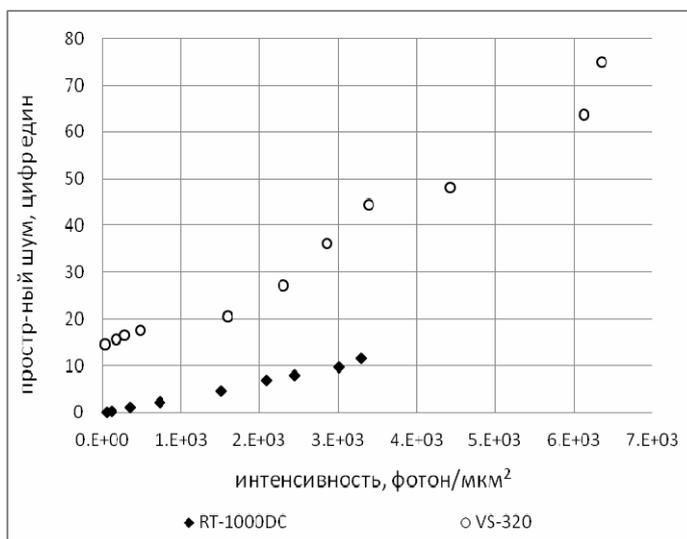


Рис. 3. Пространственные шумы видеокамер RT-1000DC и VS-320

Рост временного шума для кремниевой видеокамеры RT-1000DC (см. рис. 2) можно описать зависимостью пропорциональной корню квадратному из интенсивности фона. Поведение временного шума, в InGaAs видеокамере VS-320 не аппроксимируется аналогичной корневой зависимостью. Возможная причина может заключаться в том, что в этой камере большой вклад дает собственный темновой шум. Несколько неожиданным оказалось то, что временные шумы видеокамеры VS-320 (см. рис. 2) имеют в 2 раза меньшие значения, чем у видеокамеры RT-1000DC, при интенсивностях фонового излучения до 3000 фотонов/мкм². Такая ситуация может объясняться тем, что у видеокамеры VS-320 в 5 раз больше площадь фотоприемного пикселя и, соответственно в $\sqrt{5}$ раз больше временной шум, но в 10 раз меньше интегральная чувствительность, чем у видеокамеры RT-1000DC. Кроме того, как-то может влиять обстоятельство, что световой поток от объекта съем-

ки в диапазоне чувствительности InGaAs видеокамеры (от 0,9 до 1,7 мкм) меньше светового потока в диапазоне 0,4 до 1 мкм чувствительности кремниевой камеры.

Из рис. 3 видно, что видеокамера RT-1000DC имеет меньшие пространственные шумы, чем InGaAs видеокамера VS-320. Так пространственный шум InGaAs видеокамеры VS-320 при интенсивностях фонового излучения 3000 фотонов/мкм² в 4,5 раз больше чем аналогичные шумы видеокамеры RT-1000DC, а по максимальным значениям в 8 раз больше.

Из полученных результатов измерения пространственных шумов можно определить неравномерность чувствительности между пикселями фотоприемной матрицы для каждой испытанной видеокамеры. Величина этой неравномерности чувствительности (PRNU) определялась в соответствии со стандартом [11] по формуле:

$$PRNU = \frac{\sqrt{N_{50\%,s}^2 - N_{dark,s}^2}}{A_{50\%} - A_{dark}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $N_{50\%,s}$ и $A_{50\%}$ – пространственный шум и амплитуда сигнала в цифровых единицах на половине от величины насыщения, $N_{dark,s}$ и A_{dark} – пространственный шум и амплитуда сигнала в темновом изображении также в цифровых единицах. Амплитуды $A_{50\%}$ и A_{dark} определялись из рис. 3, при переходе от интенсивности фона в фотонах/мкм² к амплитуде сигнала в цифровых единицах. Определенные таким способом величины неравномерности чувствительности оказались равными 0,26 % для видеокамеры RT-1000DC и 2 % для видеокамеры VS-320. Несмотря на более высокую неравномерность чувствительности у InGaAs видеокамеры, полученный результат может оказаться обнадеживающим, если учесть, что такого вида неравномерность может быть скорректирована, как об этом заявлено в работе [13].

3. Сравнительное испытание видеокамер при регистрации звезды

Сравнение кремниевой видеокамеры RT-1000DC с индий-галлий-арсенидовой видеокамерой VS-320 проводилась по регистрации Полярной звезды в сумеречное и дневное время суток. Оптическая схема регистрации располагались на равнинной местности и подробно приведена в работе [10]. Свет от звезды после отражения от зеркала диаметром 760 мм с алюминиевым отражающим покрытием поступал во входные апертуры телескопов и далее попадал на матрицы видеокамер. Зеркало было закреплено на опорно-поворотном устройстве (ОПУ), которое осуществляло «выход на звезды». Свет от звезды фокусировался каждым телескопом на фотоприемную матрицу исследуемой видеокамеры, расположенную в его фокальной плоскости. Регистрация звезды осуществлялась двумя экземплярами одинаковых телескопов Meade LX200GPS с фокусным расстоянием 2 м и диаметром входной апертуры 200 мм. При съемке звезды на сумеречном небе перед фотоприемной матрицей видеокамеры RT-1000DC, никакие светофильтры не устанавливались, а на дневном небе устанавливался красный светофильтр типа KC-17. Перед фотоприемной матрицей видеокамеры VS-320 при съемке звезды как на фоне сумеречного, так и дневного неба, светофильтры не ставились.

Регистрация проводилась 6 и 7 июля 2016 г. Съемка 6 июля осуществлялась в сумеречное время с 21:00 до 21:25 часов местного поясного времени. Высота Солнца равна $\theta = -2^\circ$, азимут $\varphi = 316^\circ$. Съемка 7 июля проходила в дневных условиях с 19:00 до 19:30 часов местного поясного времени. Высота Солнца равна $\theta = 9^\circ$, азимут равен $\varphi = 297^\circ$. Визуально оцениваемые погодные условия в оба дня регистрации были примерно одинаковы: небо в облаках, между ними размазанные слабо выраженные слоистые облака и дымка. Облака перемещались по небосводу, съемка проводилась в моменты времени, когда имел место разрыв между ними.

В сеансах наблюдений 6 и 7 июля при съемке видеокамерами RT-1000DC и VS-320 проводилась вариация времени экспозиции. При каждом значении времени экспозиции записывалась серия до 100 кадров изображений от каждой видеокамеры. При обработке в программе ImageJ в каждом снимке находилось отношение максимального (пикового) сигнала в пятне изображения к полному

шуму (временной плюс пространственный) вне пятна изображения. Далее находилась средняя по снимкам величина отношения сигнал-шум при данном времени экспозиции.

На рис. 4 в качестве иллюстрации приведены пространственные распределения амплитуды сигнала каждого пикселя фотоприемной матрицы в области 50×50 пикселей, соответственно с видеокамер RT-1000DC и VS-320. Распределения представлены для среднего кадра при амплитуде сигнала на половине от величины насыщения. Вид такого распределения показывает разброс в величине амплитуды сигнала между пикселями. Этот разброс характеризуется неравномерностью чувствительности между пикселями фотоприемной матрицы. Видно, что разброс величины амплитуды сигнала каждого пикселя фотоприемной матрицы с видеокамеры VS-320, больше чем с видеокамеры RT-1000DC.

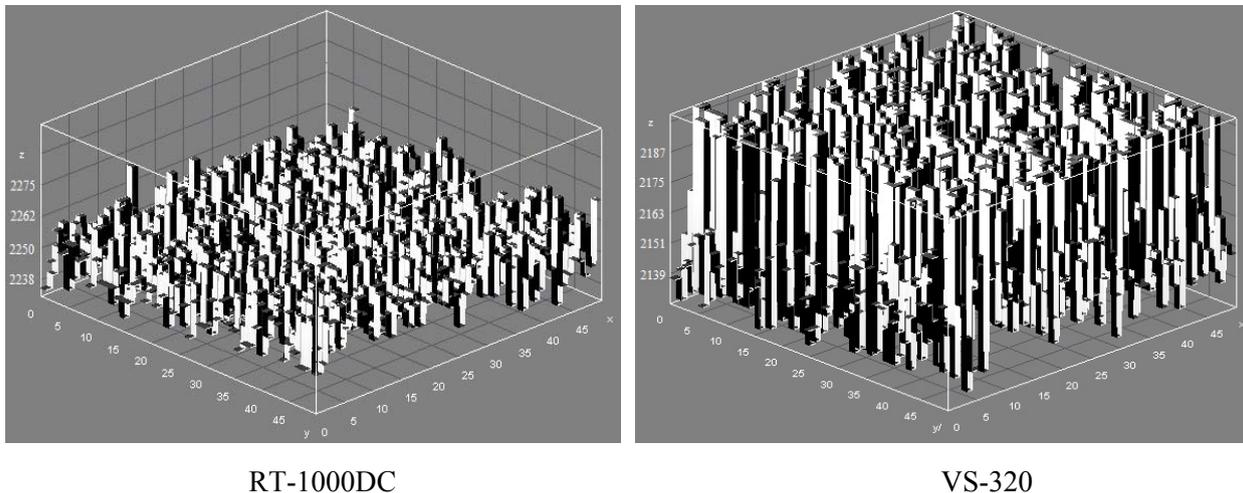


Рис. 4. Пространственное распределение амплитуды сигнала каждого пикселя фотоприемной матрицы в области 50×50 пикселей с видеокамер RT-1000DC и VS-320

На графиках, представленных на рис. 5 и 6, отложены средние значения отношения сигнал-шум в зависимости от времени экспозиции для сумеречной и дневной съемки. При сумеречной съемке регистрация осуществлялась уже на темном фоне неба, при этом время экспозиции на видеокамерах изменялось от 1 мс и достигало 300 мс. Для дневной съемки, когда фон неба был более яркий, максимальное время экспозиции на видеокамерах было уменьшено до 120 мс, чтобы избежать насыщения фотоприемного пикселя матрицы. Из рис. 5 для сумеречной съемки, видно, что отношение сигнал-шум с видеокамеры RT-1000DC до 10 раз выше, чем с видеокамеры VS-320. При дневной съемке, как видно из рисунка 6, отношение сигнал-шум с видеокамеры RT-1000DC уже только в 4 раза выше, чем с видеокамеры VS-320. Полученные результаты согласуются с данными работы [9], в которой с помощью расчетов было показано, что кремниевая видеокамера (от фирмы Андор) при дневной и ночной визуализации звезд дает большее отношение сигнал-шум по сравнению с InGaAs видеокамерой.

Сравнение результатов рис. 5 и 6 показывает некоторую особенность поведения испытанных видеокамер. Так, при переходе от сумеречной к дневной визуализации отношение сигнал-шум при регистрации видеокамерой RT-1000DC уменьшается (в 2,5 раза за счет возрастания шумов), а при регистрации видеокамерой VS-320 остается неизменным.

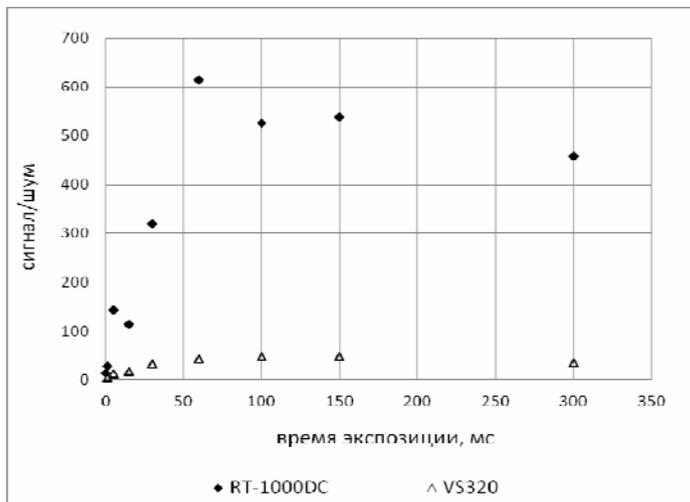


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал-шум от времени экспозиции для видеокамер RT-1000DC и VS-320. Съемка Полярной звезды в сумеречное время. Координаты Солнца: $\theta = 2^\circ$, азимут равен $\varphi = 316^\circ$

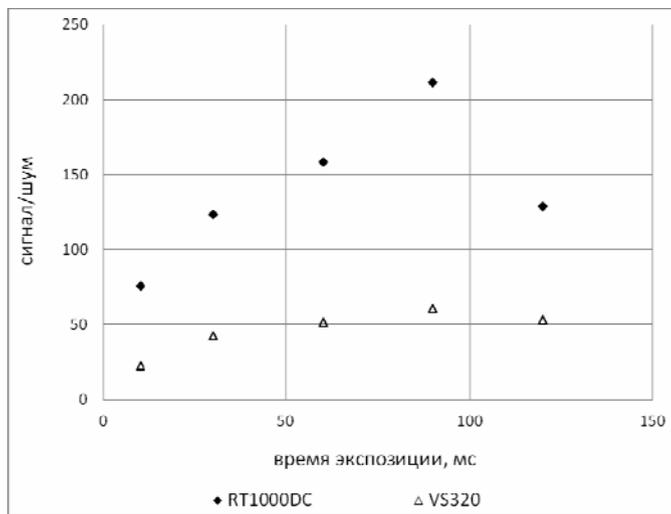


Рис. 6. Зависимость отношения сигнал-шум от времени экспозиции для видеокамер RT-1000DC и VS-320. Дневная съемка Полярной звезды. Координаты Солнца: $\theta = 9^\circ$, азимут равен $\varphi = 297^\circ$

Если в InGaAs видеокамере уменьшить неравномерность чувствительности между пикселями, то с её помощью можно достичь такой же проникающей способности в визуализации слабосветящихся звезд и космического мусора, какая была достигнута с помощью кремниевых видеокамер [10]. Уменьшить неравномерность чувствительности между пикселями (PRNU) возможно применяя, например, алгоритм двухточечной коррекции для всех пикселей матрицы [13].

Заключение

Проведенные сравнительные испытания кремниевой и InGaAs видеокамер в ходе дневной визуализации свечения неба и Полярной звезды показали следующее:

- временной фотонный шум InGaAs видеокамеры VS320 в 2 раза меньше, чем у Si видеокамеры RT-1000DC,
- пространственный шум InGaAs видеокамеры VS320 в 4,5 – 8 раз больше, чем у Si видеокамеры RT-1000DC,

• отношение «сигнал/шум» при регистрации InGaAs видеокамерой VS320 в 10 раз меньше при регистрации в сумеречных условиях и в 4 раза меньше в дневных условиях.

Если в InGaAs видеокамере VS320 уменьшить неравномерность чувствительности между пикселями, то с её помощью можно достичь такой же проникающей способности в визуализации слабосветящихся звезд, какая была достигнута с помощью кремниевых видеокамер.

Список литературы

1. Масевич А. Г. Сб. научных трудов. Проблема загрязнения космоса (космический мусор) // М., Космосинформ, 1993.
2. Масевич А. Г. Столкновения в околоземном космическом пространстве (космический мусор) // Сб. научных трудов. М.:Космосинформ, 1995.
3. Чеботарев А. Осторожно, в космосе мусор // Военный парад, сентябрь-октябрь 1996, с.139.
4. Свиридов К. Н., Белкин Н. Д. Наземная космическая система для контроля космического мусора // Конверсия в машиностроении, 1997. № 3, с. 36.
5. Авзалов И. З., Бажанов Ю. В., Бакут 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 звезд // Электромагнитные волны и электронные системы, 2009. № 12, т. 14,
6. Rork W., Lin S. S., Yakutis A. J. Наземная оптико-электронная система обнаружения в дневное время искусственных спутников в отраженном солнечном свете // Project report ETS-63, Массачусетский институт технологии, Лаборатория Линкольна, 25 Мая 1982.
7. 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.
8. Chesser D., Vunck D., Born T., Axelson W., Rehder K., Medrano R. Камера работающая в ближней инфракрасной области для улучшения возможностей дневной визуализации // Proc. SPIE, 2003. V. 5082, p. 1–12.
9. Roggemann M. C., Douglas D., Therkildsen E. и др. Модернизация и исследования дневной визуализации применительно к космической ситуационной осведомленности // АМОС 2010, Мауи, Гавай, США, 14–17 сентября 2010 г. С. 172–184.
10. Зыков Л. И., Климов А. Н., Куликов С. М. и др. Дневное наблюдение звезд слабой яркости (7^m - 8^m) любительским телескопом с равнинной местности // Сборник докладов X-ой Всероссийской школы студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, г. Саров, 2016 г.
11. EMVA Standard 1288. Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras. Release 3.0. November 29, 2010. Issued by European Machine Vision Association.
12. 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 счет пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. №4, 2012г., С. 122–136.
13. Брондз Д. С., Харитоновна Е. Н. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-го порядка // Журнал радиоэлектроника, 2008. № 11. С. 29.