



Система видеодиапазона для обзора космического пространства в ночное время суток

И. В. Знаменский, Е. О. Зотьев, И. И. Олейников, К. Г. Попов
АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения»,
Москва, Россия

Представлен результат расчета пороговой освещенности наземной оптико-электронной системы (ОЭС) в видимом диапазоне в интервале 0,45–0,85 мкм. Разработана методика и выполнен расчет освещенности входного зрачка ОЭС от сигнала космического объекта (КО) сферической формы, подсвеченного Солнцем, в ночное время суток. Построена зависимость отношения сигнал-шум от дальности от Земли до КО.

Ключевые слова: оптико-электронная система, видимый диапазон, яркость зенитного неба, матричный фотоприемник, пороговая освещенность, время накопления, отношение сигнал-шум, атмосфера, фотон, коэффициент габаритной яркости

Статья получена: 01.07.2022

Статья принята: 04.08.2022

ВВЕДЕНИЕ

Поиск объектов космического мусора, а также сопровождение космических объектов (КО) ведется путем обзора небесной сферы с помощью наземных комплексов, содержащих опорно-поворотные устройства, вращающихся с угловой скоростью до 15 градусов в секунду ($^{\circ}/\text{s}$) и имеющих широкое поле зрения. При этом важнейшими критериями являются скорость обзора и пороговая чувствительность.

Сравнительный анализ современных фотоприемных камер приведен в работе [1, 2]. Для ускорения обзора небесной сферы фотоприемники

Video Range System for Outer Space Survey During The Night

I. V. Znamensky, E. O. Zotiev, I. I. Oleinikov, K. G. Popov
Scientific and Production Corporation «Precision Instrumentation Systems» JSC, Moscow, Russia

The calculation result of the threshold illumination of a ground-based optoelectronic system (OES) in the visible range of 0.45–0.85 microns is provided. We have developed the method and performed the light calculation of the OES entrance pupil from the signal of a spherical space object (SO) illuminated by the Sun during the night. The dependence of the signal-to-noise ratio on the distance from the Earth to the SO is shown.

Keywords: optoelectronic system, visible range, zenith sky brightness, matrix photodetector, threshold illumination, accumulation time, signal-to-noise ratio, atmosphere, photon, overall brightness coefficient.

Received on: 01.07.2022

Accepted on: 04.08.2022

INTRODUCTION

The search for space debris, as well as tracking of space objects (SO) is performed by the celestial sphere survey using the ground operating complexes containing the antenna pedestals rotating at an angular velocity of up to 15 degrees per second ($^{\circ}/\text{s}$) and having a wide field of vision. In this case, the most important criteria are the scanning speed and threshold sensitivity.

A comparative analysis of modern photodetector cameras is given in [1, 2]. To speed up the celestial sphere survey, the photodetectors shall have the largest possible format and high resolution. Moreover, it is necessary to consider that the space debris has small dimensions and weak luster, but relatively high velocity. Therefore, high sensitivity at the high frame rate is required. For the purpose of object photometry, a high dynamic range of the video channel is also necessary [1].

The development of back-illuminated sensors, such as GSense4040(BSI) [3] or GSense6060(BSI) [4] made by GPixellInc (PRC), allow to solve the problem of space moni-



должны обладать как можно большим форматом и высоким разрешением. При этом надо учитывать, что объекты космического мусора имеют небольшие размеры и слабый блеск, а движутся с большими скоростями. Следовательно, необходима высокая чувствительность при высокой частоте считывания кадров. Для целей фотометрии объектов необходим также высокий динамический диапазон видеоканала [1].

Появление сенсоров с обратной засветкой, например, таких как GSense4040(BSI) [3] или GSense6060(BSI) [4] фирмы GPixellInc (КНР) позволяют решить задачу мониторинга космического пространства. Кроме того, структура sCMOS-сенсора при высоком динамическом диапазоне имеет большую емкость потенциальной ямы, несмотря на малый размер пикселя. Помимо этого sCMOS(BSI) сенсоры имеют высокую квантовую эффективность (более 90%).

Значение шума считывания становится доминирующим параметром, определяющим предел обнаружения, и определяет соотношение сигнал-шум при очень низкой освещенности [5, 6]. Технология sCMOS-матриц (Scientific Complementary Metal-Oxide Semiconductor) получила широкое признание в различных областях науки и техники благодаря сочетанию следующих характеристик: чрезвычайно низкого уровня шума, высокой частоте кадров, широкому динамическому диапазону, высокой квантовой эффективности, высокому разрешению и большому полю зрения.

Сенсор sCMOS-матрицы GSense6060(BSI) с форматом 6144×6144 имеет большое поле зрения и высокое разрешение при низком шуме считывания и удовлетворительной частоте кадров. Величина шума считывания незначительна даже по сравнению с величинами самых высоко производительных CCD (ПЗС) матриц. Низкий уровень шума считывания $3 e$ sCMOS-матрицы дополняется высоким динамическим диапазоном 90,6 dB при скорости 11 кадров в секунду и высокой квантовой эффективностью 95%. В данной статье для энергетического расчета оптического канала дляочных наблюдений КО будут использованы параметры сенсора GSense6060(BSI) [4].

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НОЧНОГО КАНАЛА ОЭС

Яркость зенитного неба лежит в диапазоне $15\text{--}19,25^m$ [угл. с]⁻² (приблизительно $1,1 \cdot 10^{-1}\text{--}2,2 \cdot 10^{-3}$ кд м⁻²) [4]. В общем приближении

toring. In addition, the sCMOS sensor structure with a high dynamic range has a large potential well capacitance, despite the small pixel output size. In addition, the sCMOS(BSI) sensors have high quantum efficiency (more than 90%).

The read-out noise value becomes the dominant parameter that determines the detection limit and establishes the signal-to-noise ratio at very low illumination levels [5, 6]. The sCMOS array (Scientific Complementary Metal-Oxide Semiconductor) technology has become widely popular in various fields of science and technology due to the combination of the following specifications: extremely low noise level, high frame rate, wide dynamic range, high quantum efficiency, high resolution and large field of vision.

The sensor of GSense6060(BSI) sCMOS array with 6144×6144 format has a large field of vision and high resolution simultaneously with the low read-out noise and a satisfactory frame rate. The read-out noise value is negligible, even compared to the CCD arrays with the highest performance. The low read-out noise $3e$ of the sCMOS sensor is complemented by a high dynamic range of 90.6 dB at 11 frames per second and a high quantum efficiency of 95%. In this article, the parameters of GSense6060(BSI) [4] will be used for the energy calculation of the optical channel for nighttime SO surveys.

CALCULATION OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE OES NIGHT CHANNEL

The zenith sky brightness is located in the range of $15\text{--}19,25^m[\text{угл. с}]^2$ (approximately $1,1 \cdot 10^{-1} \text{--} 2,2 \cdot 10^{-3}$ cd m⁻²) [4]. As a general approximation, it is possible to accept $2,7 \cdot 10^{-3}$ cd m⁻² ($19,00^m$ [угл. с]⁻²) as a representative of a truly black sky, although there may be any parts of the sky darker than this in an uncut section.

The darkest sky on Earth has a zenith brightness of approximately 22 stellar arcs per second ($1,71 \cdot 10^{-4}$ cd m⁻²). The sky background on a clear moonless night being a combination (in descending order) of natural airglow, zodiacal light, and scattered starlight, is changed depending on solar activity [7].

The given stellar magnitude outside the atmosphere is determined as [7]

$$\mu_v = 12,58 - 2,5 \lg(B_v),$$

where B_v is the light brightness of the sky background, cd · m⁻².

The expression for μ_v was obtained at small spatial angles $\Delta\Omega$, av., then the illumination is $E_v = B_v \Delta\Omega$.

The relations between the energy and light characteristics is determined as



можно принять $2,7 \cdot 10^{-3}$ кд м $^{-2}$ (19,00 m [угл. с] $^{-2}$) как представитель действительно темного неба, хотя на нетронутом участке могут быть участки неба темнее, чем это.

Самое темное небо на Земле имеет яркость в зените примерно 22 звездных дуги в секунду ($1,71 \cdot 10^{-4}$ кд · м $^{-2}$). Фон неба в ясную безлунную ночь, являющийся комбинацией (в порядке убывания) естественного воздушного свечения, зодиакального света и рассеянного звездного света, меняется в зависимости от солнечной активности [7].

Приведенная звездная величина вне атмосферы определяется в виде [7]:

$$\mu_v = 12,58 - 2,5 \lg(B_v),$$

где B_v – световая яркость фона неба, кд · м $^{-2}$.

Выражение для μ_v получено при небольших пространственных углах $\Delta\Omega$, ср, тогда освещенность $E_v = B_v \Delta\Omega$.

Связь между энергетическими и световыми характеристиками определяется в виде:

$$B_v = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda S(\lambda) d\lambda,$$

где $S(\lambda)$ – спектральная чувствительность приемника в полосе $\lambda_1-\lambda_2$, $\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1$, L_λ – энергетическая яркость ночного неба в диапазоне 0,45–0,85 мкм, Вт · см $^{-2}$ · ср $^{-1}$.

Скорость счета фотонов n_b , с $^{-1}$ на элементе матрицы, обусловленная фоновым излучением небосвода в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$, имеет вид [8]:

$$n_b = L_\lambda \tau_{atm}(\lambda) (a / F_l)^2 T_{opt} S_l / E_q,$$

где: $\tau_{atm}(\lambda)$ – средний коэффициент пропускания атмосферы в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$; a – размер пикселя элемента матрицы (сторона квадрата), см; F_l – заднее фокусное расстояние приемного объектива, см; $T_{opt}=T_l \cdot T_{IF}$ – коэффициент пропускания приемной оптики, T_l и T_{IF} – коэффициенты пропускания объектива и интерференционного фильтра соответственно; $S_l=\pi(D_l/2)^2$ – площадь приемного объектива диаметром D_l , см; $E_q=hc/\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ – энергия кванта, Дж, $h=6,6256 \cdot 10^{-34}$, Дж · с, – постоянная Планка, $c=3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; λ_0 – средняя длина волны, мкм, $\lambda_0=(\lambda_1+\lambda_2)/2$.

Максимальное время наблюдения τ_{ac} ограничено емкостью потенциальной ямы пикселя C_e [8] и возникает при $n_s=0$. Минимальное

$$B_v = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda S(\lambda) d\lambda,$$

where $S(\lambda)$ is the spectral sensitivity of the receiver in the $\lambda_1-\lambda_2$ band, $\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1$, L_λ is the night sky radiance in the range of 0.45–0.85 μm, W · cm $^{-2}$ · av $^{-1}$.

The photon count rate n_b , s $^{-1}$, on the array element, due to the background radiation of the sky in the spectral range $\Delta\lambda$, has the following view [8]

$$n_b = L_\lambda \tau_{atm}(\lambda) (a / F_l)^2 T_{opt} S_l / E_q,$$

where: $\tau_{atm}(\lambda)$ is the average atmospheric transmissivity in the spectral range $\Delta\lambda$; a is the pixel size of the array element (square side), cm; F_l is the back focal length of the receiving lens, cm; $T_{opt}=T_l \cdot T_{IF}$ is the transmittance factor of the receiving optics, T_l and T_{IF} are the transmittance factors of the lens and the interference filter, respectively; $S_l=\pi(D_l/2)^2$ is the receiving lens area with the diameter D_l , cm; $E_q=hc/\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ is the quantum energy, J, $h=6,6256 \cdot 10^{-34}$ is the Planck's constant, c=3·10 8 m/s is a light velocity; λ_0 is the average wavelength, μm, $\lambda_0=(\lambda_1+\lambda_2)/2$.

The maximum survey time τ_{ac} is limited by the capacity of the pixel potential well C_e [8] and occurs at $n_s=0$. The minimum survey time τ_{ac} is limited by the array parameter and occurs at the maximum photon count rate n_{smax} . The inequality for the survey time is determined as

$$(C_e K_z - N_{re}) / [\eta(n_b + n_{smax}) + n_d] \leq \tau_{ac} \leq (C_e K_z - N_{re}) / [\eta n_b + n_d], \quad (1)$$

where K_z is the safety factor, $K_z=0,9-0,95$;

N_{re} is the number of read-out noise electrons;

η is the quantum efficiency of the array;

n_s is the count rate of signal photons on the array element,

n_d is the count rate of dark electrons, $n_d=i_d/e$

i_d is the dark current of the array, e is the elementary charge, $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Using the dependence $\tau_{ac}=f(n_s)$, we have plotted the graph shown in Fig. 1. The graph represents the dependence of the accumulation time on the count rate of signal photons on a logarithmic scale, calculated for the initial data indicated above in the spectral band of 0.45–0.85 μm.

The signal-to-noise ratio by power at the array output is determined with due regard to the geometric noise as follows [8]:

$$Q_p = (\eta n_s \tau_{ac})^2 / (\sigma_\Sigma)^2, \quad (2)$$

where $(\sigma_\Sigma)^2$ is the total noise dispersion,

$$\sigma_\Sigma = [(\sigma_{nt})^2 + ((\sigma_{ng})^2)]^{0,5};$$



время наблюдения τ_{ac} , ограничено параметром матрицы и возникает при максимальной скорости счета фотонов n_{smax} . Неравенство для времени наблюдения определяется в виде:

$$(C_e K_z - N_{re}) / [\eta(n_b + n_{smax}) + n_d] \leq \tau_{ac} \leq (C_e K_z - N_{re}) / [\eta n_b + n_d], \quad (1)$$

где K_z – коэффициент запаса, $K_z = 0,9-0,95$;
 N_{re} – число электронов шума считывания;
 η – квантовая эффективность матрицы;
 n_s – скорость счета сигнальных фотонов на элементе матрицы;
 n_d – скорость счета темновых электронов;
 $n_d = i_d/e$, i_d – темновой ток матрицы;
 e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Используя зависимость $\tau_{ac} = f(n_s)$, построен график, показанный на рис. 1. График представляет зависимость времени накопления от скорости счета сигнальных фотонов в логарифмическом масштабе, рассчитанный для исходных данных указанных выше, в спектральной полосе 0,45–0,85 мкм.

Отношение с/ш по мощности на выходе матрицы определяется с учетом геометрического шума в виде [8]:

$$Q_p = (\eta n_s \tau_{ac})^2 / (\sigma_\Sigma)^2, \quad (2)$$

где $(\sigma_\Sigma)^2$ – суммарная дисперсия шума:

$$\sigma_\Sigma^2 = [(\sigma_{nt})^2 + ((\sigma_{ng})^2)^{0.5}];$$

$(\sigma_{nt})^2$ – дисперсия временного шума:

$$(\sigma_{nt})^2 = [\eta \tau_{ac} (n_b + n_s) + n_d \tau_{ac} + (N_{re})^2];$$

$(\sigma_{ng})^2$ – дисперсия геометрического шума.

Временной шум включает: тепловой шум Джонсона, дробовый шум, шум считывания. Матричным ФПУ присущ геометрический шум, возникающий из-за неоднородности параметров отдельных элементов приемника и схем считывания сигналов с этих элементов. Для снижения геометрического шума до приемлемого уровня производится специальная обработка сигнала в виде компенсации или коррекции неоднородности, которая может выполняться до преобразования аналоговых сигналов в цифру.

Как показано в работах [6], при приеме слабых сигналов для уменьшения геометрического шума использовать время накопления не более 200 мс, а для увеличения отношения сигнал-шум предлагается суммировать несколько кадров.

При коррекции стремятся свести уровень геометрического шума до уровня временного или меньше [9]. Принимаем $\sigma_{ng} = \sigma_{nt}$, тогда $K_g = 2$ и $(\sigma_\Sigma)^2 = K_g (\sigma_{nt})^2$.

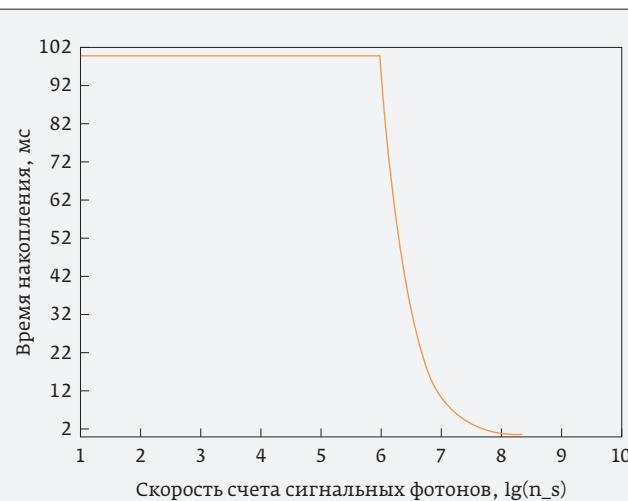


Рис. 1. Зависимость времени накопления от скорости счета сигнальных фотонов

Fig. 1. Dependence of the accumulation time on the signal photon count rate

$(\sigma_{nt})^2$ is the temporal noise dispersion,

$$(\sigma_{nt})^2 = [\eta \tau_{ac} (n_b + n_s) + n_d \tau_{ac} + (N_{re})^2];$$

$(\sigma_{ng})^2$ is the geometric noise dispersion.

The temporal noise shall include the following: Johnson thermal noise, shot noise, and read-out noise. The array-based photodetectors are characterized by geometric noise occurred due to the non-uniformity of parameters of the receiver individual elements and the signal readout circuits from these elements. To reduce geometric noise to an acceptable level, the special signal processing is performed in the form of non-uniformity compensation or correction that can be carried out prior to conversion of the analog signals to the digital ones.

As shown in [6], when receiving weak signals, it is necessary to use an accumulation time of no more than 200 ms to reduce geometric noise, and it is proposed to combine several frames to increase the signal-to-noise ratio.

In the case of adjustment, it is recommended to reduce the geometric noise to the level of temporal noise or less [9]. We take $\sigma_{ng} = \sigma_{nt}$, then $K_g = 2$ and $(\sigma_\Sigma)^2 = K_g (\sigma_{nt})^2$.

The signal photon count rate is based on the following expression (2):

$$n_s = Q_p K_g / (2 \eta \tau_{ac} (1 + A)), \quad (3)$$

where $A = \{1 + 4[\eta \tau_{ac} n_b + n_d \tau_{ac} + (N_{re})^2] / (K_g Q_p)\}^{1/2}$;

Based on the ratio (2), we have plotted a graph of the power-based signal-to-noise ratio versus the signal

Скорость счета сигнальных фотонов находится из выражения (2):

$$n_s = Q_p K_g / (2\eta \tau_{ac})(1+A), \quad (3)$$

где $A = [1 + 4[\eta \tau_{ac} n_b + n_d \tau_{ac} + (N_{re})^2] / (K_g Q_p)]^{1/2}$.

На основании соотношения (2) построен график зависимости отношения с/ш по мощности от скорости счета сигнальных фотонов n_s (рис. 2). Расчет сделан для исходных данных, которые использованы в рис. 1.

Из рис. 2 видно, что при $n_s = 10^6$ и более отношение с/ш практически не меняется из-за уменьшения времени наблюдения до значения, определяемого параметром матрицы, равном 2 мкс.

Преобразовав выражение (2), с учетом (1) можно записать:

$$Q_{pmax} = \frac{\langle \eta n_{smax} (C_e - K_z - N_{re}) / \{ \eta (n_b - n_{smax}) + N_{re}^2 \} \rangle^2}{[(C_e K_z - N_{re}) + N_{re}^2] K_g}.$$

Преобразовав числитель с учетом, что $C_e K_z \gg N_{re}$, $n_t / (\eta n_{smax}) \rightarrow 0$, тогда получаем:

$$Q_{pmax} \approx C_e K_z / [K_g (n_b / n_{smax} + 1)^2].$$

Так как для ночного канала $n_b / n_{smax} \ll 1$, то окончательно можно получить

$$Q_{pmax} \approx C_e K_z / K_g. \quad (4)$$

Следовательно, максимальное отношение сигнал-шум по мощности ограничено емкостью потенциальной ямы и геометрическим шумом.

Размер пикселя должен быть сопряжен с главным лепестком функции рассеяния точки. Но даже в этом случае происходит потеря части энергии принимаемого сигнала. Эта потеря учитывается коэффициентом χ . Для выбранных характеристик объектива и матрицы $\chi = 0,901$.

Используя правило сложения дисперсий случайных величин [10], находим среднеквадратическое отклонение числа шумовых фотоэлектронов, поступающих на пиксель матрицы:

$$\sigma_\Sigma = \{K_g [\eta \tau_{ac} (n_b + n_s) + n_d \tau_{ac} + (N_{re})^2]\}^{1/2},$$

где множитель $K_g = 2$ учитывает геометрический шум.

Мощность шума P_n [Вт], приведенная к пикселю матрицы, при которой $Q_p = 1$, определится как:

$$P_n = \sigma_\Sigma E_q / \eta \tau_{ac}.$$

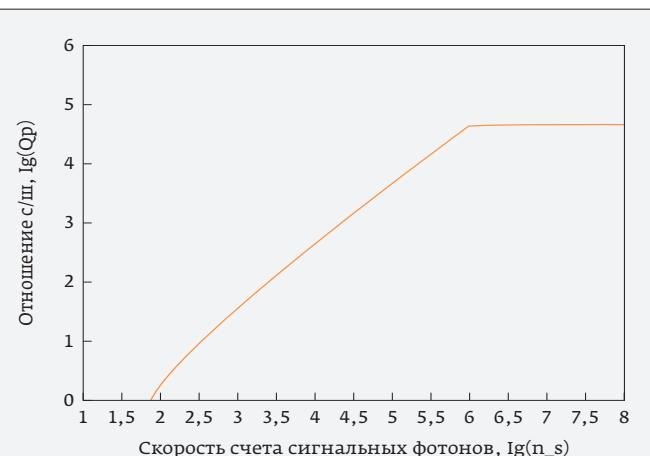


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал-шум по мощности от скорости счета сигнальных фотонов

Fig. 2. Dependence of the power-based signal-to-noise ratio on the signal photon count rate

photon count rate n_s (Fig. 2). The calculation was made for the initial data used in Fig. 1.

It can be seen from Fig. 2 that at $n_s = 10^6$ and more, the signal-to-noise ratio is almost unchanged due to the decrease in the survey time to the value determined by the array parameter equal to 2 μ s.

When transforming expression (2) with due regard to (1), it is possible to write

$$Q_{pmax} = \frac{\langle \eta n_{smax} (C_e - K_z - N_{re}) / \{ \eta (n_b - n_{smax}) + N_{re}^2 \} \rangle^2}{[(C_e K_z - N_{re}) + N_{re}^2] K_g}.$$

Having transformed the numerator with due regard to $C_e K_z \gg N_{re}$, $n_t / (\eta n_{smax}) \rightarrow 0$, then

$$Q_{pmax} \approx C_e K_z / [K_g (n_b / n_{smax} + 1)^2].$$

Since for the night channel $n_b / n_{smax} \ll 1$, it is finally possible to obtain the following

$$Q_{pmax} \approx C_e K_z / K_g. \quad (4)$$

Therefore, the maximum power-based signal-to-noise ratio is limited by the potential well capacitance and geometric noise.

The pixel size shall be paired with the main lobe of the point spread function. However, even in this case, there is a loss of part of the received signal energy. This loss is considered by the coefficient χ . For the selected specifications of the lens and array $\chi = 0.901$.

While using the additive rule for the random variable dispersions [10], we can determine the root-mean-square deviation of the number of noise photoelectrons arriving at the array pixel:



Выражение для величины пороговой освещенности E_{th} [Вт/см²] объектива имеет вид:

$$E_{th} = P_n / T_{opt} \chi \pi (D_l / 2)^2.$$

Если считать, что минимальное отношение с/ш по току, при котором обнаруживается сигнал, $Q_i=7$, то можно определить значение минимальной освещенности на входном зрачке:

$$E_{min} = P_{smin} / [T_{opt} \chi \pi (D_l / 2)^2],$$

где P_{smin} – минимальная оптическая мощность на входном зрачке: $P_{smin} = E_q n_{smin}$, где n_{smin} – скорость счета сигнальных фотонов, определяется из выражения (3) при $Q_p=49$.

Представим освещенность на входном зрачке в виде блеска (звездная величина) [7]

$$m_{min} = -2,5 \lg(E_{vmin}) - 13,99,$$

где E_{vmin} – минимальная световая освещенность на входном зрачке [лк].

Для оценки чувствительности комплекса представляется удобным использовать звездную величину m . Это позволяет осуществлять калибровку ОЭС по звездам, т.к. их звездная величина известна с высокой точностью.

На рис. 3 представлена зависимость отношения сигнал-шум по току от блеска КО. Из рис. 3 видно, что отношение сигнал-шум не меняется от $m=10$ до отрицательной величины из-за ограничения динамического диапазона, ограниченного емкостью потенциальной ямы и геометрическим шумом в соответствии с выражением (4).

ОСВЕЩЕННОСТЬ ВХОДНОГО ЗРАЧКА ПРИБОРА ИЗЛУЧЕНИЕМ КО, ПОДСВЕЧЕННОГО СОЛНЦЕМ

Рассмотрим сигнал на входном зрачке прибора от КО, освещенного Солнцем, в видимом диапазоне в ночное время суток. При расчете в качестве Солнца используем АЧТ при температуре 6 000 К. КО находится на дальности 400 км от Земли, имеет радиус $r_{ko}=0,5$ м и коэффициент отражения $\rho=0,5$.

Яркость Солнца $B_s(T, \Delta\lambda)$, Вт·м⁻²·ср⁻¹, находится в виде [8]:

$$B_s(T, \Delta\lambda) = R(T, \Delta\lambda) \cdot 10^4 / \pi.$$

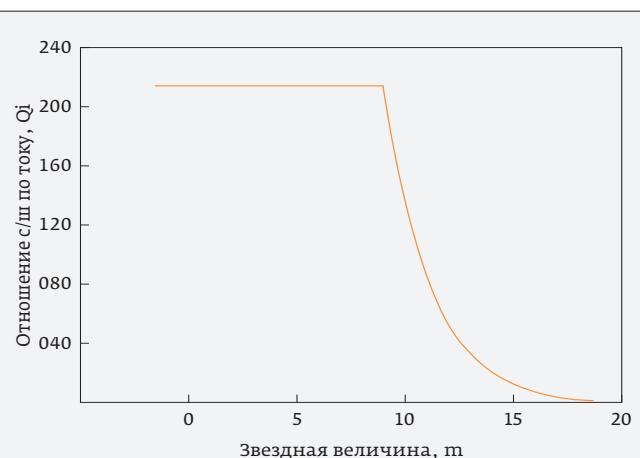


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал-шум по току от блеска объекта

Fig. 3. Dependence of the current-based signal-to-noise ratio on the object brightness

$$\sigma_\Sigma = [K_g [\eta \tau_{ac} (n_b + n_s) + n_d \tau_{ac} + (N_{re})^2]]^{1/2},$$

where the factor $K_g=2$ takes into account geometric noise.

The noise power P_n [W], reduced to an array pixel, at which $Q_p=1$, is determined as:

$$P_n = \sigma_\Sigma E_q / \eta \tau_{ac}.$$

The expression for the threshold illumination value E_{th} [W/cm²] of the lens is as follows:

$$E_{th} = P_n / T_{opt} \chi \pi (D_l / 2)^2.$$

If we assume that the minimum current-based signal-to-noise ratio at which the signal is detected is $Q_i=7$, then we can determine the minimum illumination value at the entrance pupil:

$$E_{min} = P_{smin} / [T_{opt} \chi \pi (D_l / 2)^2],$$

where P_{smin} is the minimum optical power at the entrance pupil, $P_{smin} = E_q n_{smin}$, n_{smin} is the signal photon count rate, determined on the basis of expression (3) at $Q_p=49$.

We will represent the illumination at the entrance pupil in the form of brightness (stellar magnitude) [7]

$$m_{min} = -2,5 \lg(E_{vmin}) - 13,99,$$

where E_{vmin} is the minimum light illumination at the entrance pupil [lx].

Затем определим яркость КО $B_{ko}(T, \Delta\lambda)$ [Вт·м⁻²·ср⁻¹] при наблюдении с Земли:

$$B_{ko}(T, \Delta\lambda) = BS(T, \Delta\lambda) \rho K_{db} (r_s/R_{S-ko})^2,$$

где: $r_s = 6,9599 \cdot 10^8$ м – радиус Солнца; ρ – коэффициент отражения КО; K_{db} – коэффициент габаритной яркости для сферы; R_{S-ko} – расстояние от Солнца до КО, м. K_{db} зависит от угла γ между направлениями Солнце-КО и КО-ОЭС и определяется в виде [11]:

$$K_{db} = (2/3\pi)[\sin\gamma + (\pi - \gamma)\cos\gamma];$$

$$K_{db} = 0,5 \text{ при } \gamma = 80^\circ.$$

Освещенность входного зрачка E_{inp} [Вт/см²] определяется выражением

$$E_{inp} = 10^{-4} \pi B_{ko}(T, \Delta\lambda) \tau_{atm}(\lambda) (r_{ko}/D_{E-ko})^2, \quad (5)$$

где: r_{ko} – радиус КО, D_{E-ko} – расстояние Земля-КО [м].

Поток излучения, падающий на матрицу, оказывается различным в зависимости от соотношения между размерами изображения источника излучения (КО) и пикселя. Площадь изображения источника излучения S_{im} равна [12]:

$$S_{im} = S_0 (F_l/D_{E-ko})^2.$$

Если в плоскости приемной площадки фотоприемной матрицы площадь изображения источника S_{im} больше площади пикселя $S_p = a^2$, т. е. $S_{im} > S_p$, то поток излучения, падающий на пикセル, ограничивается его размерами. Этот случай соответствует внешнему фону. Мощность фона на пикселе равна:

$$P_b = L_\lambda \tau_{atm}(\lambda) S_l T_{opt} (a/F_l)^2.$$

Если площадь изображения источника S_{im} меньше площади пикселя S_p , т. е. $S_{im} < S_p$, то поток излучения, падающий на пиксель, ограничивается размерами входного зрачка. Этот случай соответствует приему точечного сигнала. Мощность сигнала на пикселе равна:

$$P_s = J \tau_{atm}(\lambda) T_{opt} \chi S_l / (D_{E-ko})^2, \text{ где } J = S_0 B_{ko}(T, \Delta\lambda).$$

Отношение с/ш по току Q_i определяется из выражения (2):

$$Q_i = E_{inp} S_l \tau_{ac} A_l / [K_g \{\tau_{ac} (\eta (n_b + n_s) + n_d) + (N_{re})^2\}]^{0,5}, \quad (6)$$

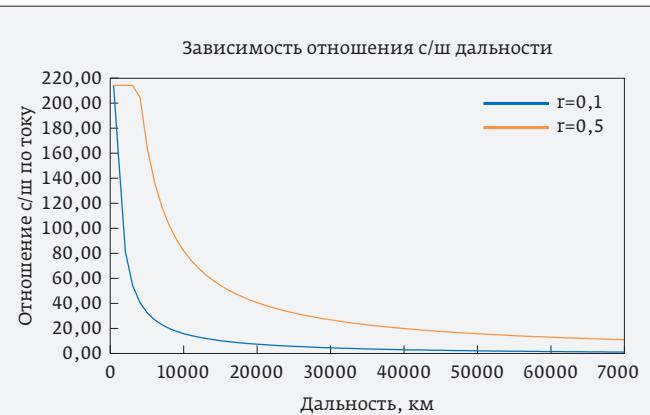


Рис. 4. Зависимость отношения с/ш по току от дальности до КО для разных радиусов сферических объектов: $r=0,1$ м – синяя линия, $r=0,5$ м – красная линия

Fig.4. Dependence of the current-based signal-to-noise ratio on the SO distance for the objects with various radii: $r=0.1$ m – blue line, $r=0.5$ m – red line

To estimate the complex sensitivity, it seems convenient to use the stellar magnitude m . This allows the OES to be calibrated by the stars, since their magnitude is known with the high accuracy.

Figure 3 shows the dependence of the current-based signal-to-noise ratio on the SO brightness. As can be seen from Fig.3, the signal-to-noise ratio does not change from $m=10$ to a negative value due to the dynamic range limitation strained by the potential well capacitance and geometric noise in accordance with the expression (4).

ILLUMINATION OF THE DEVICE ENTRANCE PUPIL BY THE SO RADIATION ILLUMINATED BY THE SUN

We will consider the signal at the entrance pupil of the device from the SO, illuminated by the Sun, in the visible range during the night. When performing calculations, we use a blackbody at a temperature of 6000 K as the Sun. The SO is located at a distance of 400 km from the Earth, it has a radius of $r_{ko} = 0,5$ m and a reflection coefficient $\rho = 0,5$.

The Sun brightness $B_S(T, \Delta\lambda)$, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{avg}^{-1}$, has the following form [8]:

$$B_S(T, \Delta\lambda) = R(T, \Delta\lambda) \cdot 10^4 / \pi.$$

Then we will determine the SO brightness KO $B_{ko}(T, \Delta\lambda)$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{avg}^{-1}$] when conducting surveys from the Earth



где $A_l = T_{opt}\chi\eta / E_q$, $\tau_{min} \leq \tau_{ac} \leq \tau_{max}$, $n_s = E_{inp}S_{ob}A_l/\eta$, E_{inp} – освещенность сигналом на входном зрачке объектива.

Используя выражения (5) и (6), а также выражение для яркости КО, рассчитаем отношение с/ш по току для различных значений дальности (рис. 4) при солнечной засветке КО в спектральном диапазоне 0.45–0.85 мкм.

$$B_{ko}(T, \Delta\lambda) = BS(T, \Delta\lambda) \rho K_{db} (r_s/R_{s-ko})^2,$$

where: $r_s = 6,9599 \cdot 10^8$ m is the radius of the Sun; ρ is the reflection coefficient of the SO, K_{db} is the overall brightness coefficient for the sphere, R_{s-ko} is the distance from the Sun to the SO, m. K_{db} depends on the angle γ between the directions of the Sun-SO and the SO-OES. and is determined as follows [11]:

Таблица. Энергетический расчет ОЭС, работающей в ночное время суток, для двух дальностей КО и радиусе сферы 0,5 м

Table. Energy calculation of the OES operating during the night for two SO ranges and a sphere radius of 0.5 m

Наименование параметра Name of the parameter	Значение Value	
Среднее число фотоэлектронов фона Average number of background photoelectrons	5,42	
Скорость счета фоновых фотонов, ф/с Background photon count rate, phot-second	60,24	
Мощность фона на пикселе, Вт Background power per pixel, W	$1,84 \cdot 10^{-17}$	
Мощность сигнала на пикселе при $Qi = 7$, Вт Signal power per pixel at $Qi = 7$, Wt	$3,76 \cdot 10^{-16}$	
Скорость счета сигнальных фотонов при $Qi = 7$, ф/с Signal photon count rate at $Qi = 7$, phot-second	1 230,69	
Время накопления, мс Accumulation time, ms	100	
Освещенность сигналом на входном зрачке при $Qi = 7$, Вт/см ² Signal illumination at the entrance pupil at $Qi = 7$, W/cm ²	$1,36 \cdot 10^{-19}$	
Звездная величина на входном зрачке от сигнала при $Qi = 7$, Stellar magnitude at the entrance pupil from the signal at $Qi = 7$,	17,33	
Средний коэффициент пропускания атмосферы в спектральном диапазоне Average atmospheric transmissivity in the spectral range	0,688	
Освещенность на входном зрачке за счет солнечной подсветки КО Illumination at the entrance pupil due to the SO sun outage	400 км 400 km	$7,59 \cdot 10^{-14}$
	40000 км 40000 km	$7,59 \cdot 10^{-18}$
Отношение с/ш по току для сигнала от КО, подсвеченного Солнцем Current-based signal-to-noise ratio for the signal from the SO illuminated by the Sun	400 км 400 km	214,23
	40000 км 40000 km	20,28
Звездная величина сигнала на входном зрачке от КО, подсвеченного Солнцем Stellar magnitude of signal at the entrance pupil from the SO illuminated by the Sun	400 км 400 km	4,64
	40000 км 40000 km	14,64



На основании представленных формул был произведен энергетический расчет ОЭС, работающей в ночное время суток, для двух дальностей КО и при $r=0,5$. На дальности 70 000 км отношение с/ш по току равно 11,4. Результаты расчета приведены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для целей обнаружения космического мусора при мониторинге космического пространства была разработана методика энергетического расчета оптико-электронной системы в видимом спектральном диапазоне в ночное время суток. Ее использование позволило установить оптимальные параметры инструментального оборудования для обзора небесной сферы. Формулы получены для объекта цилиндрической формы, подсвеченного Солнцем.

1. Найдено максимально-возможное отношение с/ш по мощности, ограниченное емкостью потенциальной ямы и геометрическим шумом.
2. Получена функциональная зависимость отношения с/ш по току от звездной величины на входном зрачке. Ее анализ показывает, что при $m \leq 10$ отношение с/ш не меняется, так как оно достигло максимального значения, а при $m > 10$ отношение с/ш зависит от звездной величины ОК.
3. Построен график зависимости отношения с/ш от дальности до КО для двух радиусов сферы 0,1 и 0,5 м. При дальности 70 000 км и радиусе сферы 0,5 отношение с/ш по току равно 11,4.
4. Определена звездная величина на входном зрачке при радиусе сферы 0,5: для дальности КО 400 км она равна 4,64, а для 40 000 км – равна 14,64. Таким образом, при изменении дальности в 100 раз звездная величина меняется на 10.

REFERENCES

1. Koates K., Fouler B., Holst G. Nauchnye cifrovye kamery. Ustraneniya ogranicenij pri ispol'zovanii nauchnoj KMOP-kamery (sCMOS). *Photonics Russia*. 2016; 58(4):102–110. DOI:10.22184 /1993–7296.2016.58.4.102.110.
Коатес К., Фоулер Б., Холст Г. Научные цифровые камеры. Устранения ограничений при использовании научной КМОП-камеры (sCMOS). *Фотоника*. 2016; 58(4):102–110. DOI:10.22184 /1993–7296.2016.58.4.102.110.
2. Afanasyeva I. V., Murzin V. A. et al. A High-Speed Low-Noise CMOS Camera for Ground-Based Observations of Space Debris Objects. Conference: Space Debris: Fundamental and Practical Aspects of the Threat. SAO RAS. DOI:10.21046 /spacedebris2019–52–57.
3. <http://en.gpixelinc.com/productMechanics/23.html>.
4. <http://en.gpixelinc.com/productMechanics/25.html>.

$$K_{db} = (2/3\pi)[\sin\gamma + (\pi - \gamma)\cos\gamma];$$

$$K_{db} = 0,5 \text{ при } \gamma = 80^\circ.$$

The entrance pupil illumination E_{inp} [W/cm²] is determined by the following expression

$$E_{inp} = 10^{-4}\pi B_{ko}(T, \Delta\lambda) \tau_{atm}(\lambda) (r_{ko}/D_{E-ko})^2, \quad (5)$$

where: r_{ko} is the SO radius, D_{E-ko} is the Earth-SO distance [m].

The radiation flux incident on the array can be different depending on the ratio between the image sizes of the radiation source (SO) and the pixel. The image area of the radiation source S_{im} is [12]:

$$S_{im} = S_0(F_l/D_{E-ko})^2.$$

If in the plane of the photodetector array receiving area the source image area S_{im} is greater than the pixel area $S_p = a^2$, i.e. $S_{im} > S_p$, then the radiation flux incident on a pixel is limited by its size. This case corresponds to the ambient background. The background power per pixel is equal to the following

$$P_b = L_\lambda \tau_{atm}(\lambda) S_l T_{opt} (a/F_l)^2.$$

If the source image area S_{im} is less than the pixel area S_p , i.e. $S_{im} < S_p$, then the radiation flux incident on the pixel is limited by the size of the entrance pupil. This case corresponds to the point signal receipt. The signal power per pixel is equal to the following:

$$P_s = J \tau_{atm}(\lambda) T_{opt} \chi S_l / (D_{E-ko})^2, \text{ where } J = S_0 B_{ko}(T, \Delta\lambda).$$

The current-based signal-to-noise ratio Q_i is determined based on the following expression (2)

$$Q_i = E_{inp} S_l \tau_{ac} A_l / [K_g \{\tau_{ac} (\eta(n_b + n_s) + n_d) + (N_{re})^2\}]^{0,5}, \quad (6)$$

where $A_l = T_{opt} \chi / E_q$, $\tau_{min} \leq \tau_{ac} \leq \tau_{max}$, $n_s = E_{inp} S_{ob} A_l / \eta$, E_{inp} is the signal illumination at the entrance pupil of the lens.

By using expressions (5) and (6), as well as the expression for the SO brightness, we will calculate the signal-to-noise ratio of the flux for various ranges (Fig. 4) in the case of the SO sun outage in the spectral range of 0.45–0.85 μm.

Based on the formulas provided, an energy calculation of the OES, operating during the night, was performed for two ranges of the SO and at $r=0.5$. At a distance of 70,000 km, the current-based signal-to-



5. Litvinovich G. S., Bruchkovskij I. I. Metodika ocenki parametrov komponent shuma PZS-detektora. 13-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya «Priborostroenie – 2020». UDK 53. 087.5.
Литвинович Г. С., Бруцковский И. И. Методика оценки параметров компонент шума ПЗС-датчика. 13-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2020». УДК 53. 087.5.
6. Litvinovich G. S., Bruchkovskij I. I. Algoritm predvaritel'noj obrabotki dannyh linejki priborov s zaryadovoj svyaz'yu na osnove adaptivnogo fil'tra Vinera. Informatika. 2021; 18(1):72–83. DOI:10.37661 / 1816–0301–2021–18–1–72–83.
Литвинович Г. С., Бруцковский И. И. Алгоритм предварительной обработки данных линейки приборов с зарядовой связью на основе адаптивного фильтра Винера. Информатика. 2021; 18(1):72–83.
DOI:10.37661 / 1816–0301–2021–18–1–72–83.
7. Crumey A. Human contrast threshold and astronomical visibility. Mon. Not. R. Astron. Soc. 2014;442: 2600–2619. DOI:10.1093 / mnras / stu992.
8. Matyuhin V. V., Parinov D. G., Tatarinova E. A. Model' shuma fotochuvstvitel'noj matricy Dalsa CM42M. Prikladnaya fizika. 2017;6: 60–67.
Матюхин В. В., Паринов Д. Г., Татаринова Е. А. Модель шума фоточувствительной матрицы Dalsa CM42M. Прикладная физика. 2017;6: 60–67.
9. Tarasov V. V., Torshina I. P., YAKushenkov Yu. G. Sovremennye problemy optotekhniki. –M.: MIIGAiK. 2014. 82 p.
Тарасов В. В., Торшина И. П., Якушенков Ю. Г. Современные проблемы оптотехники. –М.: МИИГАиК. 2014. 82 с.
10. Znamensky I. V., Zot'ev E. O., Yudin S. Yu. Comparative Analysis of Threshold Sensitivity of IR-Systems in Different Spectral Range. Photonics Russia. 2021; 15(6): 484–500. DOI: 10.22184 / 1993–7296. FRos.2021.15.6.484.500.
Знаменский И. В., Зотьев Е. О., Юдин С. Ю. Сравнительный анализ пороговой чувствительности ИК-систем в различных спектральных диапазонах. Фотоника. 2021; 15(6): 484–500. DOI: 10.22184 / 1993–7296. FRos.2021.15.6.484.500.
11. Russel H. N. On the albedo of the planets and their satellites. The ASTROPHYSICAL JOURNAL an international review of spectroscopy and astronomical physics. April 1916; XLIII (3):173–196.
12. Miroshnikov M. M. Teoreticheskie osnovy optiko-elektronnyh priborov. –SPb.: Lan'. 2010. 704 p.
Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. –СПб.: Лань. 2010. 704 с.

АВТОРЫ

Знаменский Игорь Всеволодович, к. т. н., в. н. с, АО «Научно-производственная корпорация Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК» СПП), Москва, Россия.
ORCID-0000-0002-0612-1255

Зотьев Евгений Олегович, начальник научно-технического комплекса, АО «НПК» СПП», Москва, Россия.
ORCID-0000-0002-2923-7779

Олейников Игорь Игоревич, д. т. н., начальник отделения, заместитель генерального конструктора, АО «НПК» СПП», Москва, Россия.

Попов Константин Геннадьевич, к. т. н., помощник начальника отделения, АО «НПК» СПП», Москва, Россия.
ORCID-0000-0001-8183-4231

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы обоих членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

noise ratio is 11.4. The calculation results are shown in the table.

CONCLUSION

In order to detect space debris during the space monitoring process, a special method was developed for the energy calculation of an optoelectronic system in the visible spectral range during night. Its application has made it possible to determine the optimal parameters of instrumental equipment for the celestial sphere surveys. The formulas are obtained for a cylindrical object illuminated by the Sun.

1. The maximum possible power-based signal-to-noise ratio, limited by the potential well capacity and geometric noise, is found.
2. The functional dependence of the current-based signal-to-noise ratio on the stellar magnitude at the entrance pupil is obtained. Its analysis demonstrates that at $m \leq 10$ the signal-to-noise ratio is unchanged, since it has reached its maximum value, and at $m > 10$ the signal-to-noise ratio depends on the SO magnitude.
3. A graph of the dependence of the signal-to-noise ratio on the SO distance is plotted for two sphere radii of 0.1 and 0.5 m. At a range of 70,000 km and a sphere radius of 0.5, the current-based signal-to-noise ratio is 11.4.
4. The stellar magnitude at the entrance pupil is determined at a sphere radius of 0.5: for a SO distance of 400 km, it is equal to 4.64, and for a SO distance of 40,000 km, it is equal to 14.64. Thus, when the range is changed by a factor of 100, the stellar magnitude is changed by 10.

AUTHORS

Znamenskiy Igor Vsevolodovich, Cand. of Tech. Sc., Leading Researcher, Joint-Stock Company «Scientific and Production Corporation «Precision Instrumentation Systems» (JSC «NPK «SPP»; Moscow, Russia.
ORCID-0000-0002-0612-1255

Zotyev Evgenii Olegovich, Head of the Scientific and Technical Complex, JSC «NPK «SPP»; Moscow, Russia.
ORCID-0000-0002-2923-7779

Oleinikov Igor Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, Deputy General Designer, JSC «NPK «SPP»; Moscow, Russia.

Popov Konstantin Gennadyevich, Cand. of Tech.Sc., Assistant Head of Department, JSC «NPK «SPP»; Moscow, Russia.
ORCID-0000-0001-8183-4231

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of work by all members of the team of authors.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.