

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 520.8:681.78

Система обзора космического пространства для мониторинга объектов техногенного происхождения

И.В. Знаменский¹, А.А. Тихомиров^{✉ 2*}

¹НПК «Системы прецизионного приборостроения»
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 22.07.2022 г.;
после доработки 10.08.2022 г.;
принята к печати 26.10.2022 г.

Разработана методика расчета наземной оптико-электронной системы (ОЭС) и выполнен расчет облученности входного зрачка от космического объекта цилиндрической формы, подсвеченного Солнцем в ночное время суток. Представлены результаты расчета минимальной облученности и соответствующего ей блеска на входном зрачке ОЭС при отношении сигнал/шум на выходе фотоприемной матрицы по току, равном 7 в интервале длин волн $0,45 \div 0,85$ мкм. Построена зависимость отношения сигнал/шум от дальности до космического объекта для трех его различных размеров. Разработана программа РОСН-1, представлена ее панель управления для расчета характеристик ОЭС в ночное время суток в диапазоне $0,45 \div 0,85$ мкм и показаны возможности этой программы.

Ключевые слова: мониторинг, космический мусор, наземная оптико-электронная система, облученность, блеск; monitoring, space debris, ground-based optoelectronic system, irradiance, brilliance.

Введение

За 65-летний период освоения околоземного космического пространства (ОКП) возникла проблема его засоренности объектами техногенного происхождения (побочные элементы выведения космических объектов (КО), отработавшие ресурс КО и их фрагменты после частичного разрушения и т.п.). Проблемы космического мусора (КМ), вопросы, стоящие при мониторинге КМ, и используемая терминология подробно рассмотрены в [1]. Лидерами по количеству КМ являются США, Россия и Китай. Из общего числа таких объектов порядка 70% находятся на низких околоземных орбитах (до 600 км) и около 30% — на средних и высоких орбитах. И это лишь незначительная часть КМ, которую удастся обнаружить, отследить и занести в специальные каталоги. Всего в каталоги КМ, зарегистрированного в России и США, включено более 40000 объектов [2].

Столкновения с КМ действующих в ОКП космических аппаратов и орбитальных станций приводят к нарушению их функционирования и во многих случаях способствуют их полному разрушению [1, 2].

Поиск объектов КМ, а также сопровождение КО ведется путем обзора небесной сферы с помощью оптико-электронных систем (ОЭС) — наземных комплексов, содержащих опорно-поворотные устройства с угловой скоростью до 10 град/с и оптические каналы с широким полем зрения. Важнейшими критериями работоспособности ОЭС являются ее пороговая чувствительность и скорость обзора.

В работе [3] рассмотрены оптические наблюдения малых объектов КМ и КМ, расположенного на низких орбитах, а в [4] — КМ в области орбит глобальных навигационных спутниковых систем. Для обзора ОКП в сумеречное и дневное время в ОЭС наземных комплексов широко применяется ИК-диапазон. При этом предпочтительно использовать окно прозрачности атмосферы в интервале $0,9 \div 1,7$ мкм, обеспечивающее максимальное отношение сигнал/шум (с/ш) по сравнению с другими участками ИК-диапазона, расположенными в окнах прозрачности атмосферы. В ближнем ИК-диапазоне можно наблюдать КМ, но для сравнительно небольших дальностей ($400 \div 500$ км) в дневное время и до 1500 км в сумерки.

Сравнительный анализ современных фотоприемных устройств (ФПУ) приведен в [5, 6]. К ФПУ в составе ОЭС предъявляются следующие требования. Для расширения обзора космического пространства формат матрицы этого устройства должен быть как можно больше, но с обеспечением необходимого

* Игорь Всеволодович Знаменский (06-21@nprk-spp.ru);
Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru,
tikhomirov.43@mail.ru).

разрешения, определяемого угловым размером пикселя. Поскольку объекты КМ имеют небольшие размеры, слабый блеск и движутся с большими скоростями, необходима высокая чувствительность ФПУ при большой частоте считывания кадров. Для целей фотометрии КО нужен также значительный динамический диапазон видеоканала.

Появление CMOS-сенсора Teledyne e2v CIS 113 (Англия) [7], а также сенсоров с обратной засветкой, таких как GSense4040 (BSI) [8] или GSense6060 (BSI) [9] фирмы GPixel Inc. (КНР), позволяет решить задачу мониторинга ОКП в ночное время. Структура sCMOS-сенсора при высоком динамическом диапазоне имеет большую емкость потенциальной ямы несмотря на малый размер пикселя (единицы микрометров). Помимо этого sCMOS(BSI)-сенсоры имеют высокую квантовую эффективность (более 90%).

Шум считывания становится доминирующим параметром, обуславливающим предел обнаружения, и определяет отношение с/ш при очень низкой облученности. У сенсора sCMOS-матрицы GSense4040(BSI) форматом 4096×4096 пикселей большое поле зрения и высокое разрешение при низком шуме считывания и удовлетворительной частоте кадров. Низкий шум считывания, равный 2,3 электрона sCMOS-матрицы, дополняется высоким динамическим диапазоном 85 дБ при скорости 24 кадров/с и высокой квантовой эффективности 95% на $\lambda = 600$ нм.

Целью настоящей работы является описание методики энергетического расчета наземной ОЭС обзора ОКП для обнаружения КМ, в частности КО цилиндрической формы. Для работы ОЭС в ночное время суток используется сенсор GSense4040(BSI) [8]. Определен минимальный блеск от КО на входном зрачке ОЭС, при котором отношение с/ш равно 7 в интервале длин волн $0,45 \div 0,85$ мкм.

Комплекс для обнаружения и мониторинга КМ

Структурная схема ОЭС для обнаружения и измерения угловых координат КМ представлена на рис. 1.

На опорно-поворотное устройство установлены объективы трех оптических каналов: 2 (видимый диапазон, узкое поле зрения), 6 (видимый диапазон, широкое поле зрения), 8 (ближний ИК-диапазон). Запоминающее устройство служит для хранения зарегистрированных кадров, там же регистрируются время, получаемое от системы точного времени, а также угол места и азимут, считанные с оптических датчиков ОЭС. В дневное и сумеречное время используется канал ближнего ИК-диапазона, ночью — каналы видимого диапазона.

Наведением на КМ управляет компьютер системы наведения по команде от ЭВМ. Эта система управляет положением опорно-поворотного устройства с помощью установленных на нем высокомоментных двигателей и получает данные от оптических датчиков о положении азимутальной и угло-

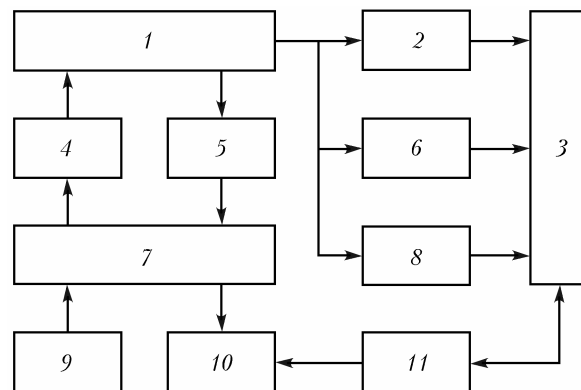


Рис. 1. Структурная схема ОЭС для мониторинга ОКП: 1 — опорно-поворотное устройство; 2, 6, 8 — объективы оптических каналов; 3 — запоминающее устройство; 4 — высокомоментные двигатели осей азимута и угла места; 5 — оптические датчики углового положения этих осей; 7 — электросиловой привод; 9 — система точного времени; 10 — компьютер системы наведения; 11 — ЭВМ

местной осей, установленных на опорно-поворотном устройстве. В режиме автосопровождения формируется сигнал ошибки, по которому осуществляется подстройка углов на наблюдаемый объект.

Расчет энергетических характеристик ночного канала ОЭС

Для того чтобы обнаружить КМ на фоне неба необходимо оценить его приведенную звездную величину, угл. с^{-2} , на входном зрачке объектива, которая определяется как [10]:

$$\mu_v = 12,58 - 2,5 \lg [\tau_{\text{atm}}(\Delta\lambda) B_V],$$

где $\tau_{\text{atm}}(\Delta\lambda)$ — коэффициент пропускания атмосферы в спектральной полосе $\Delta\lambda$; B_V — световая яркость фона неба, $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$. Выражение для μ_v получено при небольших значениях телесного угла приемного объектива $\Delta\Omega$, ср, тогда его освещенность $E_V = B_V \Delta\Omega$.

Яркость зенитного неба в видимом диапазоне составляет $(15 \div 19,25)^m \text{ угл. с}^{-2}$, т.е. приблизительно $(1,1 \cdot 10^{-1} \div 2,2 \cdot 10^{-3}) \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ [10], где m — блеск (звездная величина). Здесь, как и в [10], мы используем в расчетах светотехнические единицы. В общем приближении можно принять яркость зенитного неба равной $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$, или $19,00^m \text{ угл. с}^{-2}$, как вариант темного неба. В общем случае могут попадаться участки неба темнее, чем значение, приведенное выше.

Яркость в зените самого темного неба, наблюдаемого с Земли, примерно 22^m угл. с^{-2} , или $1,71 \cdot 10^{-4} \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ [10]. Фон неба в ясную безлунную ночь является комбинацией (в порядке убывания) естественного воздушного свечения, зодиакального и рассеянного звездного света и меняется в зависимости от солнечной активности.

Связь между энергетическими и световыми характеристиками определяется как

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

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

Скорость счета фотонов n_b , с⁻¹, на элементе матрицы, обусловленная фоновым излучением неба в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$, имеет вид [11]:

$$n_b = L_\lambda \tau_{\text{atm}}(\lambda) (a/F_1)^2 T_{\text{opt}} S_1 / E_q,$$

где $\tau_{\text{atm}}(\lambda)$ — средний коэффициент пропускания атмосферы в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$; a — размер пикселя элемента матрицы (сторона квадрата), см; F_1 — заднее фокусное расстояние приемного объектива, см; $T_{\text{opt}} = T_1 \cdot T_{\text{IF}}$ — коэффициент пропускания приемной оптики, T_1 и T_{IF} — коэффициенты пропускания объектива и интерференционного фильтра соответственно; $S_1 = \pi(D_1/2)^2$ — площадь приемного объектива диаметром D_1 , 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, $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ — средняя длина волны, мкм.

Максимум времени наблюдения τ_{ac} ограничен емкостью потенциальной ямы пикселя C_e и возникает при скорости счета сигнальных фотонов на элементе матрицы $n_s = 0$. Минимум τ_{ac} ограничен параметром матрицы и возникает при максимальной скорости счета сигнальных фотонов $n_{s \text{ max}}$. Диапазон для времени наблюдения определяется в виде

$$\frac{C_e K_z - N_{\text{re}}}{\eta(n_b + n_{s \text{ max}}) + n_d} \leq \tau_{\text{ac}} \leq \frac{C_e K_z - N_{\text{re}}}{\eta n_b + n_d}, \quad (1)$$

где $K_z = 0,9 \div 0,95$ — коэффициент запаса от переполнения потенциальной ямы; N_{re} — число электронов шума считывания; η — квантовая эффективность матрицы; $n_d = i_d/e$ — скорость счета темновых электронов, i_d — темновой ток матрицы, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона.

Матричным ФПУ присущ геометрический шум, возникающий из-за неоднородности параметров отдельных элементов приемника и схем считывания сигналов с этих элементов. Для снижения этого шума осуществляется корреляционная обработка, которая обеспечивает коррекцию неоднородности до приемлемого уровня [12]. Отношение с/ш по мощности на выходе матрицы с учетом геометрического шума вычисляется по формуле [11]:

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

где $(\sigma_\Sigma)^2$ — суммарная дисперсия шума, $\sigma_\Sigma = [(\sigma_{\text{nt}})^2 + (\sigma_{\text{ng}})^2]^{0,5}$; $(\sigma_{\text{nt}})^2 = [\eta \tau_{\text{ac}}(n_b + n_s) + n_d \tau_{\text{ac}} + (N_{\text{re}})^2]$ — дисперсия временного шума; $(\sigma_{\text{ng}})^2$ — дисперсия геометрического шума. Временной шум включает: тепловой шум Джонсона, дробовый шум и шум считывания.

Как показано в [13], при приеме слабых сигналов для уменьшения геометрического шума необходимо использовать время накопления не более 200 мс, а для увеличения отношения с/ш предлагается суммировать несколько кадров.

При коррекции геометрического шума стремятся свести его уровень к уровню временной дисперсии [12]. Принимаем $\sigma_\Sigma = \sigma_{\text{nt}}$, тогда можно записать $(\sigma_\Sigma)^2 = K_g (\sigma_{\text{nt}})^2$, где $K_g = 2$.

Скорость счета сигнальных фотонов находится из выражения (2):

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

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

На основании (2) построен график зависимости Q_p от n_s (рис. 2). Расчет сделан для исходных параметров матрицы GSense4040(BSI) [8]. Видно, что при $n_s = 10^{5,75}$ и более отношение с/ш практически не меняется из-за уменьшения времени наблюдения до 2 мкс, определяемых параметром матрицы.

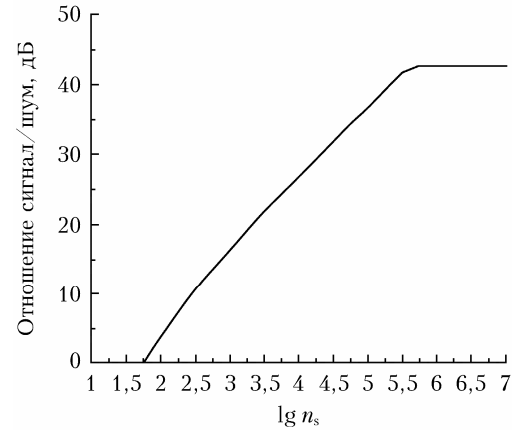


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от скорости счета сигнальных фотонов

Так как для ночного канала $n_b/n_{s \text{ max}} \ll 1$, то можно получить максимальное отношение с/ш

$$Q_{p \text{ max}} = 10 \lg(C_e K_z / K_g) \quad (4)$$

и оно будет ограничено емкостью потенциальной ямы и геометрическим шумом. Для матрицы GSense4040(BSI) $Q_{p \text{ max}} = 43$ дБ (рис. 2).

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

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

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

Приведенная мощность шума, Вт, к пикселю матрицы, при которой $Q_p = 1$, определяется как

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

Выражение для пороговой облученности, 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, равно 7, то можно определить минимальную облученность на входном зрачке

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

где $P_{smin} = E_q \cdot n_{smin}$ — минимальная оптическая мощность на входном зрачке; n_{smin} определяется из выражения (3) при $Q_p = Q_i^2 = 49$.

Представим освещенность на входном зрачке в виде блеска, тогда, следуя [10]:

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

где E_{vmin} — минимальная световая освещенность на входном зрачке, лк.

Для оценки чувствительности ОЭС удобно использовать блеск m . Это позволяет калибровать ОЭС по звездам, так как их блеск известен с высокой точностью.

На рис. 3 представлена зависимость $Q_p(m)$. Видно, что отношение с/ш не меняется от $m = 10$ до отрицательной величины из-за ограничения динамического диапазона, определяемого емкостью потенциальной ямы и геометрическим шумом в соответствии с выражением (4).

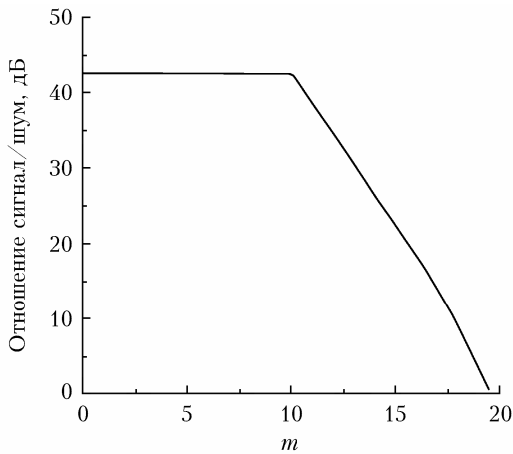


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум от блеска объекта

Облученность входного зрачка прибора излучением КО, подсвеченного Солнцем

Рассмотрим сигнал на входном зрачке ОЭС от КО, освещенного Солнцем, в видимом диапазоне в ночное время суток. При расчетах в качестве Солнца используем абсолютное черное тело (АЧТ) при температуре 6000 К. Для примера примем, что КО находится на дальности $D_{E-ko} = 19400$ км от ОЭС. Радиус КО $r_{ko} = 0,2$ м, длину $L_{ko} = 1$ м

и коэффициент отражения $\rho = 0,2$. Основные математические соотношения для расчета облученности входного зрачка ОЭС от КО цилиндрической формы, подсвеченного Солнцем, были представлены в работе [11].

Энергетическая яркость Солнца, Вт · м⁻² · ср⁻¹, находится как [11, 14]:

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

($R(T, \Delta\lambda)$ — светимость Солнца; T — температура, К).

Определим энергетическую яркость КО, Вт · м⁻² · ср⁻¹, при наблюдении с Земли

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

где $r_S = 6,9599 \cdot 10^8$ м — радиус Солнца; K_{db} — коэффициент габаритной яркости для цилиндра [14]; R_{S-ko} — расстояние от Солнца до КО; $K_{db} = S_{ko} / S_0$, где $S_0 = 2r_{ko}L_{ko}$, S_0 — проекция площади КО, засвеченного Солнцем, S_{ko} — эффективная площадь КО, видимая с ОЭС. K_{db} зависит от углов γ , ξ_1 , ξ_2 и определяется как

$$K_{db} = \cos(\xi_1) \cos(\xi_2) \frac{(\pi - \delta + 0,5 \sin(2\delta) \cos \delta + \sin^3 \delta)}{\pi},$$

где $\cos \delta = (\cos \gamma) / \cos(\xi_1) \cdot \cos(\xi_2) + \operatorname{tg}(\xi_1) \cdot \operatorname{tg}(\xi_2)$ при $\gamma \geq (\xi_1 + \xi_2)$ и $\gamma < 180^\circ - |\xi_1 - \xi_2|$; γ — угол между направлениями Солнце—КО и КО—ОЭС; ξ_1 , ξ_2 — углы между плоскостью, перпендикулярной продольной оси КО, и направлением на Солнце и ОЭС соответственно; δ — угол в плоскости, перпендикулярной продольной оси КО, между проекциями на нее направлений Солнце—КО и КО—ОЭС.

Облученность входного зрачка, Вт/см², определяется выражением

$$E_{inp} = 10^{-4} B_{ko}(T, \Delta\lambda) \tau_{atm}(\lambda) S_0 / (D_{E-ko})^2. \quad (5)$$

Поток излучения, падающий на матрицу, различается в зависимости от соотношения между размерами изображения источника излучения (КО) и пикселя. Площадь изображения источника излучения [15]:

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

Если S_{im} больше площади пикселя $S_p = a^2$, т.е. поток излучения, падающий на пиксель, ограничивается его размерами. Этот случай соответствует приему точечного сигнала. Мощность сигнала на пикселе равна

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

Если $S_{im} < S_p$, то поток излучения, падающий на пиксель, ограничивается размерами входного зрачка. Этот случай соответствует приему точечного сигнала. Мощность сигнала на пикселе равна

$$P_s = J \tau_{atm}(\lambda) T_{opt} \chi S_l / (D_{E-ko})^2,$$

где $J = S_0 B_{ko}(T, \Delta\lambda)$.

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

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

$A_i = T_{\text{opt}} \chi \eta / E_q$, $\tau_{\text{min}} \leq \tau_{\text{ac}} \leq \tau_{\text{max}}$; $n_s = E_{\text{inp}} S_{\text{ob}} A_i / \eta$.

Используя соотношение (5), а также выражение для яркости КО в спектральном диапазоне $0,45 \div 0,85$ мкм, рассчитываем зависимость отношения с/ш от дальности до КО при солнечной заливке для трех длин цилиндрического КО (рис. 4).

На основании представленных формул был произведен энергетический расчет ОЭС, работающей в ночное время суток, для $D_{\text{E-ko}} = 19400$ км при $r_{\text{ko}} = 0,2$ м, $L_{\text{ko}} = 1,0$ м, $\rho = 0,2$ и $Q_i = 7$. Для выбранных параметров отношение с/ш равно 27,54 дБ. Результаты расчета приведены в таблице.

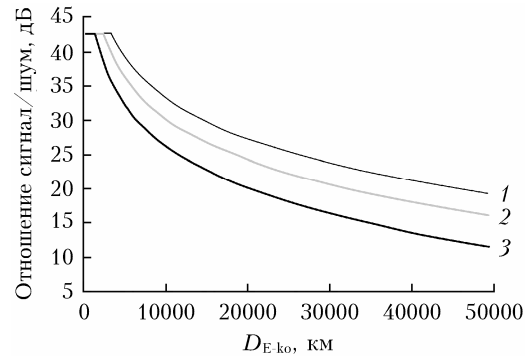


Рис. 4. Зависимость отношения сигнал/шум от дальности при $L_{\text{ko}} = 1,0$ (1); 0,5 (2); 0,2 м (3)

Интерфейс программы

Интерфейс разработанной программы расчета ОЭС видимого диапазона в ночное время суток (РОСН-1) показан на рис. 5. Входными данными

Энергетический расчет ОЭС, работающей в ночное время суток ($D_{\text{E-ko}} = 19400$ км)

Параметр	Значение
Среднее число фотоэлектронов фона	5,51
Скорость счета фоновых фотонов, ф/с*	48,8
Мощность фона на пикселе, Вт	$1,49 \cdot 10^{-17}$
Мощность сигнала на пикселе, Вт	$3,6315 \cdot 10^{-16}$
Скорость счета сигнальных фотонов, ф/с	1187,57
Время накопления, мс	100
Облученность сигналом на входном зрачке при $Q_i = 7$, Вт/см ²	$1,35 \cdot 10^{-19}$
Блеск на входном зрачке от сигнала при $Q_i = 7$, безразмерная	16,31
Средний коэффициент пропускания атмосферы в спектральном диапазоне, безразмерный	0,688
Облученность на входном зрачке за счет солнечной подсветки КО, Вт/см ²	$1,441 \cdot 10^{-18}$
Отношение с/ш для сигнала от КО, подсвеченного Солнцем, дБ	27,54
Блеск на входном зрачке от КО, подсвеченного Солнцем, безразмерный	14,28

* ф — фотон.

Рис. 5. Панель ввода исходных данных и выдачи команд

для программы являются параметры матрицы, приемного объектива, объекта контроля и атмосферы. С помощью программы вводятся исходные данные, а результаты расчета можно вывести на экран монитора и бумажный носитель. Как видно из рис. 5, программа учитывает параметры атмосферы.

В программе предусмотрены команды (ниже заключены в кавычки), в результате которых на экране монитора отображаются следующие данные:

- «Исх.данные» — исходные данные.
- «ГрафикТАУ» — график зависимости времени накопления от скорости счета сигнальных фотонов.
- «ГрафикОр» — отношение с/ш (дБ) от скорости счета сигнальных фотонов.
- «График m_zv» — отношение с/ш (дБ) от блеска на входном зрачке.
- «График Dko» — отношение с/ш (дБ) от дальности (км) до КО.
- «График атм.» — зависимость спектрального коэффициента пропускания атмосферы от длины волны в диапазоне 0,4–0,85 мкм.
- «График_V» — зависимость спектрального коэффициента пропускания ФПУ от длины волны, также кривая видности.

Заключение

Рассмотрена наземная ОЭС обзора ОКП для обнаружения КМ техногенного происхождения на дальностях до нескольких десятков тысяч километров. ОЭС включает канал видимого диапазона для наблюдения КО в ночное время. В качестве ФПУ в этом канале использована матрица GSense 4040(BSI) с рабочим диапазоном $0,45 \div 0,85$ мкм.

Разработана методика энергетического расчета такой ОЭС, позволяющая установить оптимальные параметры инструментального оборудования. Соотношения для расчета ОЭС получены для КО цилиндрической формы, подсвеченного Солнцем.

Найдена зависимость отношения с/ш от блеска КО на входном зрачке ОЭС, которая показывает, что при $m \leq 10$ отношение с/ш не меняется, так как оно достигает максимального значения, а при $m > 10$ отношение с/ш зависит от блеска КО. Показано, что для используемой матрицы максимальное отношение с/ш ограничено емкостью потенциальной ямы пикселя и геометрическим шумом матрицы.

Получены соотношения для расчета облученности входного зрачка ОЭС излучением КО, подсвеченного Солнцем, для трех геометрических размеров КО в диапазоне дальностей до 50000 км. Определено, что блеск КО на входном зрачке для дальности 19400 км равен 14,28.

Представлен интерфейс разработанной программы расчета ОЭС видимого диапазона в ночное время суток, которая обеспечивает ввод разных исходных данных для расчетов и построения различных графиков, определяющих эффективность работы системы при различных параметрах атмосферы.

Список литературы

1. Шустов Б.М. О фундаментальных исследованиях по проблеме космического мусора // Сб. тр. Всерос. конф. «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы», 17–19 апреля 2019 г. М.: ИКИ РАН, 2019. 236 с. С. 7–14. DOI: 10.21046/spacedebris 2019-7-14.
2. Оголев А.В., Морозов С.В. Анализ засоренности околоземного космического пространства объектами техногенного происхождения и их влияние на функционирование космических аппаратов // Сб. тр. Всерос. конф. «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы», 17–19 апреля 2019 г. М.: ИКИ РАН, 2019. 236 с. С. 15–19. DOI: 10.21046/spacedebris 2019-15-19.
3. Коробцев И.В., Мишина М.Н. Оптические наблюдения малых космических аппаратов и космического мусора в Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5, № 4. С. 117–121. DOI: 10.12737/szf-54201913.
4. Коробцев И.В., Цуккер Т.Г., Мишина М.Н., Горяшин В.Е., Еселевич М.В. Наблюдения космического мусора в области орбит глобальных навигационных спутниковых систем // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 3. С. 115–123. DOI: 10.12737/szf-63202014.
5. Афанасьева И.В., Мурзин В.А., Ардианов В.И., Иващенко Н.Г., Притырченко М.А., Борисенко А.Н. Высокоскоростное малошумящее фотоприемное устройство для наземных наблюдений объектов космического мусора // Сб. тр. Всерос. конф. «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы», 17–19 апреля 2019 г. М.: ИКИ РАН, 2019. 236 с. С. 52–57. DOI: 10.21046/spacedebris2019-52-57.
6. Матюхин В.В., Паринов Д.Г., Татарникова Е.А. Модель шума фоточувствительной матрицы DalsaCM42M // Прикл. физ. 2017. № 6. С. 60–67.
7. Shiang-Yu Wang, Hung-Hsu Ling, Bo-Jhou Wang, Geary J.C., Shu-Fu Hsu, Pratloug J., Lehner M., Jordan P. The characteristic of Teledyne e2v CIS 113 CMOS sensors // Proc. SPIE. 2020. V. 11454. DOI: 10.1117/12.2561204.
8. Image sensor Gpixel GSense4040(BSI). URL: <https://www.gpixel.com/products/area-scan-en/gsense/gsense4040bsi/> (last access: 20.05.2022).
9. Image sensor Gpixel GSense6060(BSI). URL: <https://www.gpixel.com/products/area-scan-en/gsense/gsense6060bsi/> (last access: 20.05.2022).
10. Crumey A. Human contrast threshold and astronomical visibility // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2014. V. 442, N 3. P. 2600–2619. DOI: 10.1093/mnras/stu992.
11. Знаменский И.В., Зотьев Е.О., Юдин С.Ю. Сравнительный анализ пороговой чувствительности ИК-систем в различных спектральных диапазонах // Фотоника. 2021. Т. 15, № 6. С. 484–500. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.6.484.500.
12. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Современные проблемы оптотехники: учеб. пособие. М.: МИИГАиК, 2014. 82 с.
13. Литвинович Г.С., Бручковский И.И. Алгоритм предварительной обработки данных линейки приборов с зарядовой связью на основе адаптивного фильтра Винера // Информатика. 2021. Т. 18, № 1. С. 72–83. DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-1-72-83.
14. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Кудряшов К.В. Отражение оптического излучения поверхностью объем-

ных тел с направленно-рассеивающим покрытием // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 10. С. 58–63.

15. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2010. 704 с.

I.V. Znamenskii, A.A. Tikhomirov. Outer space surveillance system for monitoring technogenic objects.

A technique has been developed and a calculation has been made of the irradiance of the entrance pupil of a ground-based optoelectronic system (OES) from a cylindrical space object illuminated by the Sun at night. The results of calculating the minimum irradiance and corresponding stellar magnitude at the input pupil of the OES are presented with a signal-to-noise ratio at the output of the photodetector matrix with a current equal to 7 in the wavelength range of $0.45 \div 0.85 \mu\text{m}$. The dependence of the signal-to-noise ratio on the distance to the space object for its three different sizes is constructed. The program ROSN-1 was developed and its control panel was presented for calculating the characteristics of the OES at night in the range of $0.45 \div 0.85 \mu\text{m}$ was presented, and the possibilities of this program were explained.