

УДК 519.6+520.2

Методика оценки характеристик обнаружения оптико-электронной системы ГЕОДСС наземного базирования

Зиновьев Ю.С.¹, Мишина О.А.^{2*}, Захаров А.Ю.², Хатанзейская М.А.¹

¹*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

²*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
имени Д.Ф. Устинова, 1-ая Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, 190005, Россия*

**e-mail: olga_a_mishina@mail.ru*

Статья поступила 25.06.2019

Аннотация

В статье рассматривается методический аппарат оценивания характеристик обнаружения фотометрического канала оптико-электронной системы наземного базирования ГЕОДСС. Оценка проводится по эталонным объектам, находящимся на геостационарной орбите. Учитывается неравномерность квантовой эффективности фотоприемного устройства (ФПУ) по рабочему спектральному диапазону. Рассмотрена возможность работы телескопа в полосах Джонсона. Приводятся основные выражения для расчета как интегрального отношения сигнал/шум, так и в полосах Джонсона.

Ключевые слова: оптико-электронная система наземного базирования, характеристики обнаружения, квантовая эффективность, полосы Джонсона, космические объекты, звездная величина.

Введение

Системы контроля космического пространства (СККП) России и США созданы для контроля космических объектов и мониторинга засоренности околоземного космического пространства космическим мусором [1, 2, 3, 4, 5]. По обнаруженным объектам ведется динамический каталог, в котором содержатся сведения о назначении космических объектов (КО), их принадлежности, параметрах орбит, различных некоординатных характеристиках. Эта информация подлежит периодическому уточнению по результатам регулярных наблюдений КО и космического мусора [6, 7, 8, 9].

Важной составляющей СККП США является наземный электронно-оптический комплекс зондирования глубокого космоса ГЕОДСС (GEODSS – Ground based Electro-Optical Deep Space Surveillance) [10, 11, 12].

Основные тактико-технические характеристики (ТТХ) этого комплекса были известны [13, 14]. Однако после того, как комплекс подвергся модернизации и получил современные ПЗС-приемники [15] информация о его новых возможностях практически отсутствует. В частности, представляет интерес его проникающая способность по малым объектам на геостационарных и высокоэллиптических орбитах, возможности по работе в полосах Джонсона, что открывает направление по спектральной классификации КО. В этой связи проведение моделирования данного комплекса с использованием новой информации о его ТТХ, известных из открытых источников [10, 16, 17], позволяет оценить его потенциальные характеристики по обнаружению как КО, так и космического мусора.

В работе [10] рассмотрены некоторые характеристики оптико-электронной системы (ОЭС) телескопа видимого диапазона наземного базирования системы GEODSS. Однако в ней отсутствует методический подход, позволяющий оценить ряд базовых характеристик указанной системы (проницающая способность и т.п.).

В работах [18, 19, 20] рассмотрены методические основы оценки ряда базовых характеристик телескопов. Однако в этих работах не учитывается существенная неравномерность квантовой эффективности современных ФПУ, которые функционируют в видимом диапазоне, а также отсутствуют оценки проницающей способности этих телескопов при работе по объектам на геостационарной орбите, а также оценки возможностей использования полос Джонсона для решения задач спектральной селекции.

Рассмотрим методический аппарат, позволяющий решить указанные выше задачи.

Основные соотношения для расчета потока оптического излучения

Как известно, обнаружение объекта в поле зрения телескопа производится по пороговому принципу [18, 19, 21, 22]. В его основе лежит условие, согласно которому значение потока оптического излучения, полученного от объекта наблюдения $\Phi_{об}$ должно в $q_{тр}$ раз превышать эквивалентный пороговый поток Φ_{Σ} :

$$q = \frac{\Phi_{об}}{\Phi_{\Sigma}} = \frac{\Phi''_{об}(\Delta\lambda)}{\sigma_{\Sigma}} \geq q_{ТР} \quad (1)$$

где q – отношение сигнал/шум;

$q_{тр}$ – требуемое отношение сигнал/шум;

$\Phi''_{об}(\Delta\lambda)$ – полный поток от объекта (в электронах);

σ_{Σ} – значение среднеквадратичного отклонения (СКО) суммарного шума ФПУ (в электронах).

$$\Phi_{об} = \frac{\tau * \tau_a * K_{исп} * J_{об} * A_{вх}}{D^2}, \quad (2)$$

где τ – коэффициент пропускания оптической системы телескопа;

τ_a – коэффициент затухания в атмосфере;

$K_{исп}$ – коэффициент использования энергии светового пятна;

$J_{об}$ – сила излучения объекта в в диапазоне чувствительности ФПУ;

$A_{вх}$ – площадь входной апертуры телескопа;

d_0 – диаметр вторичного зеркала ОЭС.

$$K_{исп} = \begin{cases} \frac{(\Delta x)^2}{\pi \cdot r_{эф}^2}, & \text{при } 2r_{эф} > \Delta x \\ 1 & , \text{при } 2r_{эф} \leq \Delta x \end{cases} \quad (3)$$

где $r_{эф}$ – эффективный радиус кружка рассеяния;

Δx – линейный размер элемента разложения ФПУ.

$$r_{эф} = \frac{0,61 * \lambda_{ср} * f}{d} \quad (4)$$

где λ – граничная длина волны диапазона чувствительности ФПУ;

f – фокусное расстояние телескопа.

Для оценки энергетических параметров телескопа рассмотрим два типа эталонных объектов с заданными характеристиками: зеркальную и диффузную сферы. Проведем оценку величины $J_{об}$ для этих объектов.

А. Отражение от зеркальной сферы

Сила излучения объекта в направлении ОЭС в диапазоне чувствительности ФПУ

$$J_{об} = J_{зер} = \frac{\rho_3 * R_3^2 * E_0(\Delta\lambda)}{4} \quad (5)$$

где ρ_3 – коэффициент отражения от зеркальной сферы ($\rho_3 = 0,8$);

R_3 – радиус зеркальной сферы;

$E_0(\Delta\lambda)$ – величина солнечной постоянной для диапазона $\Delta\lambda$.

Значения величины солнечной постоянной $E_0(\Delta\lambda)$ для различных диапазонов длин волны (для 4-х полос Джонсона) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения величины солнечной постоянной $E_0(\Delta\lambda)$ для различных диапазонов длин волны

Спектральные области Джонсона	Значение солнечной постоянной $E_0(\Delta\lambda)$, Вт/м ²
$\Delta\lambda_1 = 0,4 \dots 0,5$ мкм	187,6
$\Delta\lambda_2 = 0,5 \dots 0,6$ мкм	183,4
$\Delta\lambda_3 = 0,6 \dots 0,8$ мкм	287,0
$\Delta\lambda_4 = 0,8 \dots 1,0$ мкм	183,4
$\Delta\lambda = 0,4 \dots 1,0$ мкм	840

Б. Отражение от диффузной сферы (при фазовом угле $\varphi = 0$)

Сила излучения

$$J_{об} = 0,66 * R_d * \rho_d * E_0(\Delta\lambda) \quad (6)$$

где R_d – радиус диффузной сферы;

ρ_d – коэффициент отражения от диффузной сферы ($\rho_d = 0,1$).

Полный поток от объекта в квантах определяется из соотношения

$$\Phi_{об}' = \Phi_{об} * \frac{\lambda_{cp}}{h * c} \quad [\text{фотон/сек}] \quad (7)$$

где λ_{cp} – средняя длина волны для поддиапазонов $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3, \Delta\lambda_4$;

c – скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/сек).

Полный поток от объекта в электронах

$$\Phi_{об}''(\Delta\lambda_1.. \Delta\lambda_4) = \Phi_{об}'(\Delta\lambda_1) * \eta(\lambda_{cp1}) * T_H + \Phi_{об}'(\Delta\lambda_2) * \eta(\lambda_{cp2}) * T_H + \Phi_{об}'(\Delta\lambda_3) * \eta(\lambda_{cp3}) * T_H + \Phi_{об}'(\Delta\lambda_4) * \eta(\lambda_{cp4}) * T_H \quad (8)$$

где T_H – время накопления.

Значения величин $\eta(\lambda_{cp1})$, $\eta(\lambda_{cp2})$, $\eta(\lambda_{cp3})$, $\eta(\lambda_{cp4})$ берутся из таблицы 2.

Таблица 2 – Значения квантовой эффективности для 4-х поддиапазонов спектральной чувствительности матрицы ССІD-16

Полоса $\Delta\lambda$	Диапазон полосы (нм)	Средняя длина волны λ_{cp}	η (для λ_{cp})
$\Delta\lambda_1$	400 – 500	450	0,8
$\Delta\lambda_2$	500 – 600	550	0,88
$\Delta\lambda_3$	600 – 800	700	0,8
$\Delta\lambda_4$	800 – 1000	900	0,3

Результаты расчетов потока оптического излучения

При проведении расчетов будем варьировать радиус наблюдаемого объекта: $R_3 = 0,55$ м; 0,18 м; 0,11 м; 0,028 м. Значения радиусов R_3 выбраны из соображений сопоставимости получаемых результатов с результатами работы [10].

Оценку целесообразно провести для значений коэффициентов пропускания атмосферы τ_a , характерных для двух значений зенитного угла θ (0 и 70 градусов).

Указанные значения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов пропускания атмосферы для поста №1

Спектральные области, мкм	Зенитные углы, град	
	0°	70°
0,4...0,5	0,73	0,54

0,5...0,6	0,81	0,66
0,6...0,8	0,79	0,66
0,8...1,0	0,67	0,53
0,4...1,0	0,74	0,6

*) Пост №1 расположен в Сокорро, штат Нью-Мексика

Все дальнейшие оценки будем проводить с использованием таблицы 4, имея в виду, что в телескопе ГЕОДСС применяется приемная матрица CCID-16 [16].

Таблица 4 – Исходные данные для моделирования

Условные обозначения	Наименование параметра	Значения
$\Delta\lambda$	рабочий диапазон, нм	400 – 1000
$q_{тр}$	требуемое отношение сигнал / шум	4-5
q	отношение сигнал/шум	без обработки сигнала
$A_{вх}$	площадь входного зрачка, м ²	0,713
d	диаметр объектива ОЭС, м	1,02
d_0	диаметр вторичного зеркала ОЭС, м	0,362
τ	коэффициент пропускания оптической системы	0,5
$\tau_a = f(\theta)$	коэффициент пропускания атмосферы	см. таблицу 3
θ	зенитный угол	0, 70 градусов
D	расстояние до объекта, км	36 000
λ	граничная длина волны диапазона чувствительности ФПУ ОЭС, нм	1000
f	фокусное расстояние оптической системы, м	2,18
Δx	размер элемента разложения (пикселя) ФПУ, мкм	24x24
h	постоянная Планка, Дж*сек	$6,6*10^{-34}$
η	квантовая эффективность ФПУ	см. таблицу 2
σ_c	СКО шума считывания	12 е
$\sigma_{ус}$	СКО шума видеоусилителя	7 е
B_ϕ	спектральная плотность энергетической яркости фона космоса, Вт/(м ² *ср*мкм)	$27*10^{-7}$
N_{max}	глубина ячейки ФПУ	140 000 е
n	разрядность АЦП	12

График силы излучения зеркального объекта $J_{об}$ (уравнение 5) в направлении ОЭС в диапазоне чувствительности ФПУ для всего рабочего диапазона $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм представлен на рисунке 1.

Значения силы излучения объекта $J_{об}$ в направлении ОЭС в диапазоне чувствительности ФПУ в полосах Джонсона даны в таблице 5.

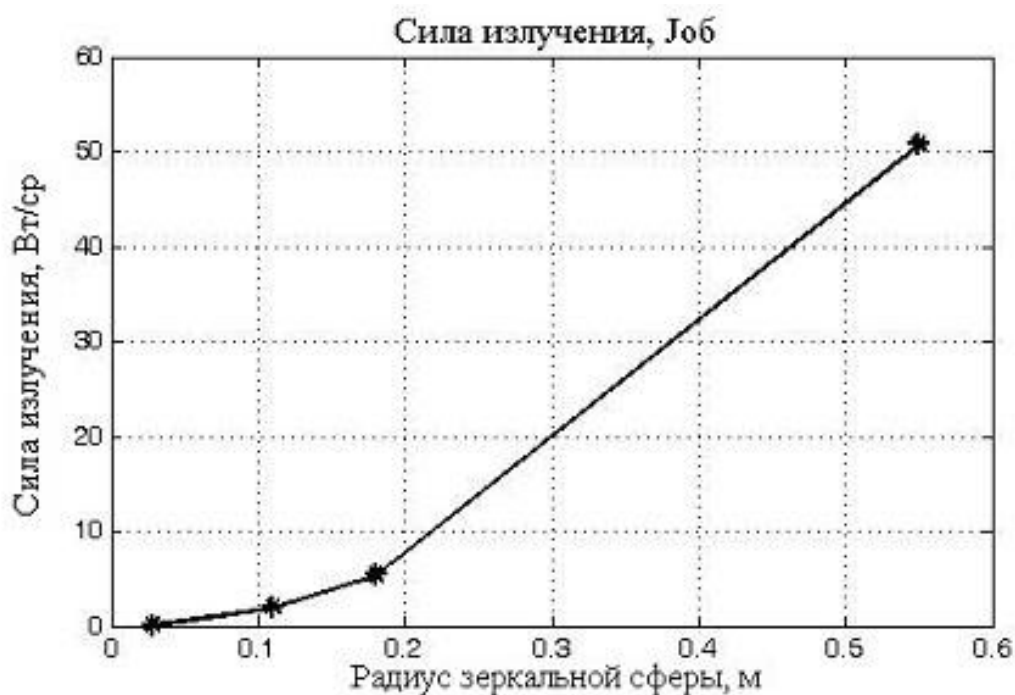


Рисунок 1 – Зависимость силы излучения объекта $J_{об}$ в направлении ОЭС от радиуса в диапазоне чувствительности ФПУ для всего рабочего диапазона $\Delta\lambda$

Таблица 5 – Сила излучения зеркального объекта $J_{об}$ в направлении ОЭС в диапазоне чувствительности ФПУ в полосах Джонсона

Радиус зеркальной сферы $R_з$, м	0,55	0,18	0,11	0,028
Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм				
Сила излучения объекта $J_{об}$, Вт/ср	50.8200	5.4432	2.0328	0.1317
Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 500$ нм				
	11.3498	1.2156	0.4540	0.0294
Спектральная область $\Delta\lambda = 500 - 600$ нм				
	11.0957	1.1884	0.4438	0.0288
Спектральная область $\Delta\lambda = 600 - 800$ нм				
	17.3635	1.8598	0.6945	0.0450
Спектральная область $\Delta\lambda = 800 - 1000$ нм				

	11.0957	1.1884	0.4438	0.0288
	Проверка результатов по полосам Джонсона			
	50.9047	5.4523	2.0362	0.1319

Значения полного потока при зенитных углах наблюдения 0 и 70 градусов сведены в таблицу 6.

Величина потока оптического излучения от объекта наблюдения в зависимости от радиуса зеркальной сферы представлена на рисунке 2.

Таблица 6 – Поток оптического излучения от зеркального объекта во всем рабочем диапазоне

Оцениваемый параметр	Радиус зеркальной сферы Rз, м			
	0,55	0,18	0,11	0,028
Сила излучения объекта Job, Вт/ср	50.8200	5.4432	2.0328	0.1317
Зенитный угол 0 град	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм			
Поток Фоб 1.0e-013 *	0.1036	0.0111	0.0041	0.0003
Поток Фоб 1.0e+004 * в квантах	3.6616	0.3922	0.1465	0.0095
Зенитный угол 70 град	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм			
Поток Фоб 1.0e-014 *	0.8398	0.0899	0.0336	0.0022
Поток Фоб 1.0e+004 * в квантах	2.9688	0.3180	0.1188	0.0077

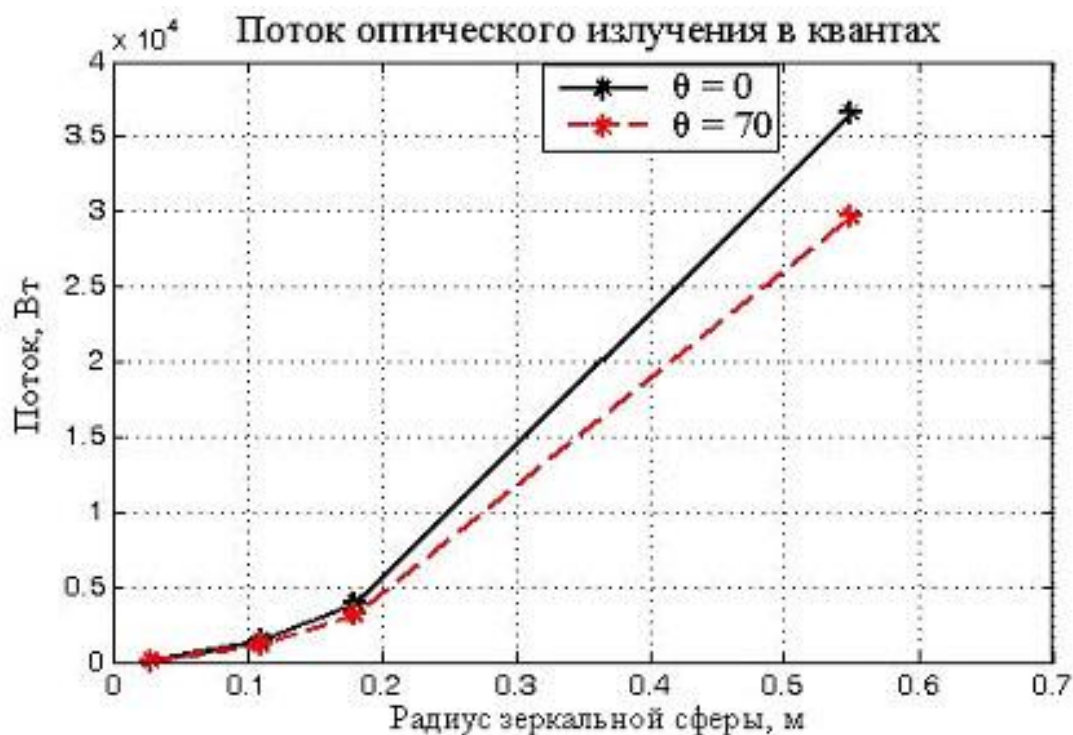


Рисунок 2 – Зависимость потока оптического излучения от объекта от радиуса зеркальной сферы (в квантах) при $\theta = 0$ и 70 градусов

Теперь рассчитаем значения потока оптического излучения от объекта наблюдения в полосах Джонсона.

Для зенитного угла наблюдения 70 градусов результаты представлены в таблице 7 и на рисунке 3.

Таблица 7 – Значения величины потока оптического излучения от объекта наблюдения в полосах Джонсона при $\theta = 70$ градусов

Оцениваемый параметр	Радиус зеркальной сферы R_3 , м			
	0,55	0,18	0,11	0,028
Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм				
Сила излучения объекта $J_{об}$, Вт/ср	50.8200	5.4432	2.0328	0.1317
Поток $\Phi_{об}$ $1.0e-014$ *	0.8398	0.0899	0.0336	0.0022
Поток $\Phi_{об}$ $1.0e+004$ * (в квантах)	2.9688	0.3180	0.1188	0.0077
Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 500$ нм				
Сила излучения объекта $J_{об}$, Вт/ср	11.3498	1.2156	0.4540	0.0294
Поток $\Phi_{об1}$ $1.0e-014$ *	0.1688	0.0181	0.0068	0.0004
Поток $\Phi_{об1}$ $1.0e+003$ * (в квантах)	3.8362	0.4109	0.1534	0.0099

Спектральная область $\Delta\lambda = 500 - 600$ нм				
Сила излучения объекта Job, Вт/ср	11.0957	1.1884	0.4438	0.0288
Поток Фоб2 $1.0e-014$ *	0.2017	0.0216	0.0081	0.0005
Поток Фоб2 $1.0e+003$ * (в квантах)	5.6023	0.6000	0.2241	0.0145
Спектральная область $\Delta\lambda = 600 - 800$ нм				
Сила излучения объекта Job, Вт/ср	17.3635	1.8598	0.6945	0.0450
Поток Фоб3 $1.0e-014$ *	0.3156	0.0338	0.0126	0.0008
Поток Фоб3 $1.0e+004$ * (в квантах)	1.1158	0.1195	0.0446	0.0029
Спектральная область $\Delta\lambda = 800 - 1000$ нм				
Сила излучения объекта Job, Вт/ср	11.0957	1.1884	0.4438	0.0288
Поток Фоб4 $1.0e-014$ *	0.1620	0.0173	0.0065	0.0004
Поток Фоб4 $1.0e+003$ * (в квантах)	7.3617	0.7885	0.2945	0.0191
Поток $\Phi_{об1234}$ $1.0e+004$ * (в квантах)	2.7958	0.2995	0.1118	0.0072

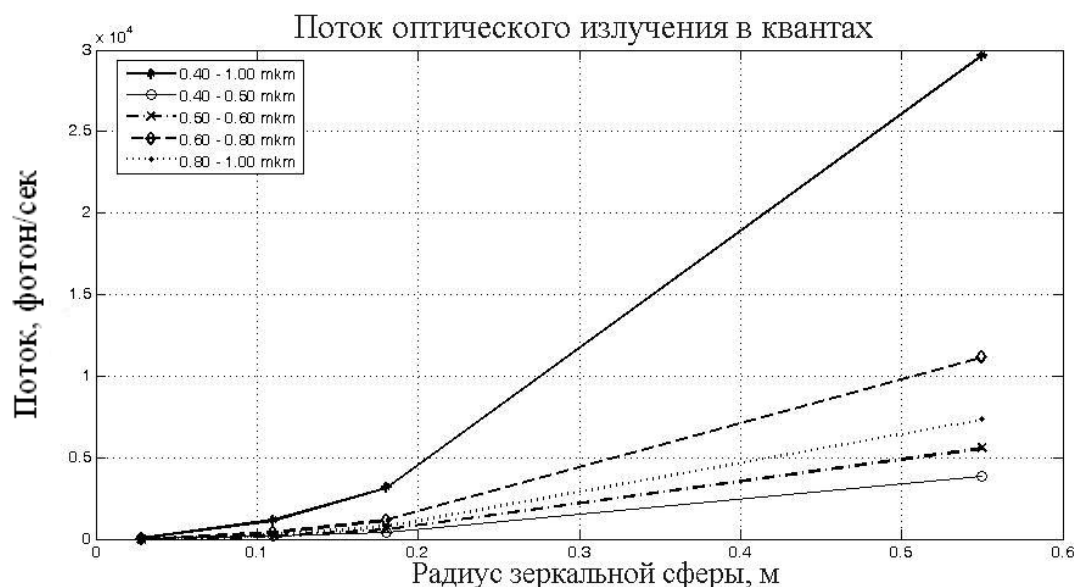


Рисунок 3 – Зависимость величины потока оптического излучения от объекта от радиуса зеркальной сферы (в квантах) при $\theta = 70$ градусов в полосах Джонсона

Значения величины полного потока в электронах сведены в таблицу 8.

Зависимость величины потока оптического излучения объекта наблюдения в

электронах от радиуса зеркальной сферы для зенитных углов 0 и 70 градусов представлена на рисунке 4.

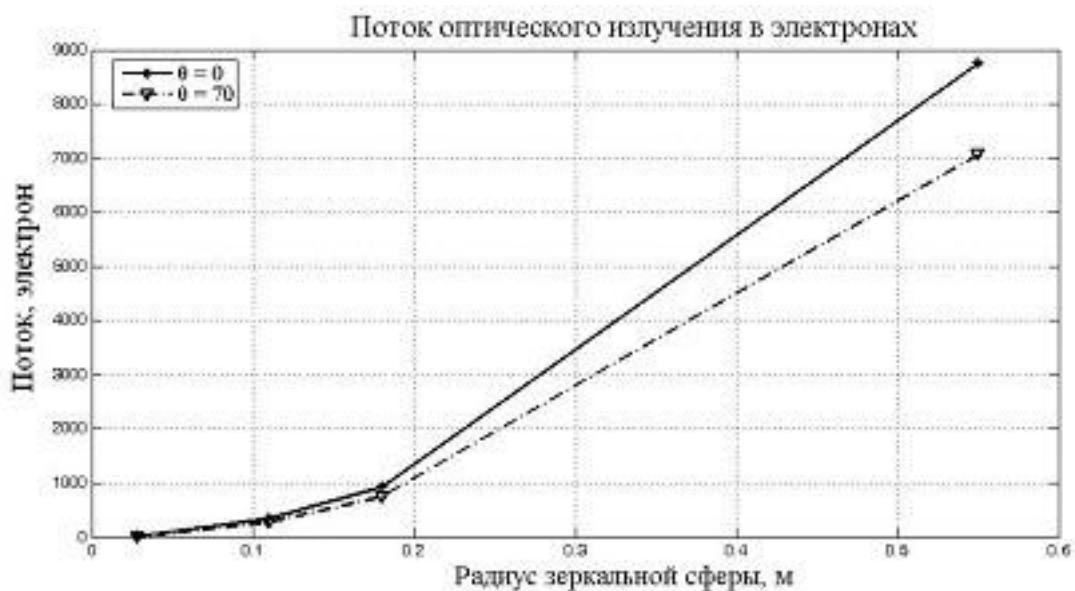


Рисунок 4 – Зависимость величины потока оптического излучения объекта наблюдения в электронах от радиуса зеркальной сферы для зенитных углов 0 и 70 градусов

Таблица 8 – Значения величины полного потока в электронах

Радиус зеркальной сферы Rз, м	Спектральная область Δλ = 400 – 1000 нм			
	0,55	0,18	0,11	0,028
Зенитный угол 0 градусов				
Поток Фоб 1.0e+003 * в электронах	8.7600	0.9383	0.3504	0.0227
Зенитный угол 70 градусов				
Поток Фоб 1.0e+003 * в электронах	7.0795	0.7583	0.2832	0.0183

Основные соотношения для расчета СКО суммарного шума и результаты оценки

Значение СКО суммарного шума может быть найдено по формуле:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\phi}^2 + \sigma_T^2 + \sigma_c^2 + \sigma_{yc}^2 + \sigma_{АЦП}^2} \quad (9)$$

Рассмотрим перечисленные шумовые составляющие.

1) Шум распределенного фона космоса

В первом спектральном интервале $\Delta\lambda_1$:

$$\sigma_{\phi 1}^2 = \frac{\eta(\lambda_{cp1}) * \lambda_{cp1}}{h * c} * \left[\frac{\tau * B_{\phi} * A_{вх} * (\Delta x)^2 * T_H * \Delta\lambda_1}{f^2} \right] \quad (10)$$

где T_H – время накопления.

Результаты расчетов $\sigma_{\phi 1}^2$, $\sigma_{\phi 2}^2$, $\sigma_{\phi 3}^2$, $\sigma_{\phi 4}^2$ показали, что порядок их величин 10^{-5} , и при оценке уровня шума ими можно пренебречь.

2) Шум темнового тока

$$\sigma_T = 6\bar{e} * T_H \text{ [электрон]} \quad (11)$$

3) Шум считывания

В соответствии с ТТХ ФПУ ССІD-16 [16] шум считывания составляет

$$\sigma_c = 12 \text{ [электрон]}$$

4) Шум типового видеоусилителя (СКО, приведенная к его входу)

$$\sigma_{yc} = 7 \text{ [электрон]}$$

5) Шум дискретизации по уровню АЦП

$$\sigma_{АЦП} = \frac{N_{\max}}{2^n * \sqrt{12}} \text{ [электрон]} \quad (12)$$

Отношение сигнал/шум (в электронах):

$$q = \frac{\Phi''_{об}(\Delta\lambda)}{\sigma_{\Sigma}} \quad [\text{электрон}] \quad (13)$$

В результате суммарное СКО составляет величину порядка 17 $\bar{\epsilon}$. Результаты расчетов СКО суммарного шума представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты расчетов СКО суммарного шума

Обозначение	Характеристика	Значение
σ_T	СКО темнового тока	2.22 $\bar{\epsilon}$
σ_c	СКО шума считывания	12 $\bar{\epsilon}$
σ_{yc}	СКО шума видеосуилителя	7 $\bar{\epsilon}$
$\sigma_{АЦП}$	СКО шума дискретизации по уровню АЦП	9.86 $\bar{\epsilon}$
σ_{Σ}	Суммарное СКО	17.18 $\bar{\epsilon}$

Значения отношения сигнал/шум от размера зеркальной сферы при изменении времени накопления приведены в таблице 10.

Поведение параметров обнаружения в полосе Джонсона с наихудшей квантовой эффективностью $\eta = 0,3$ для поддиапазона $\Delta\lambda = 800 - 1000$ нм представлено в таблице 11.

Таблица 10 – Значения отношения сигнал/шум при изменении времени накопления, зенитный угол $\theta = 0$ градусов

Зенитный угол 0 гр	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм			
Радиус зеркальной сферы R_z , м	0,55	0,18	0,11	0,028
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 0,37$ с)	509.7817	54.6014	20.3913	1.3212
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 1$ с)	1310.6	140.4	52.4	3.4
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 1,5$ с)	1842.9	197.4	73.7	4.8
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 2$ с)	2272.0	243.3	90.9	5.9
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 20$ с)	3906.7	418.4	156.3	10.1

Таблица 11 – Значения отношения сигнал/шум при изменении времени накопления для поддиапазона $\Delta\lambda = 800 - 1000$ нм, зенитный угол $\theta = 0$ градусов

Зенитный угол θ гр	Спектральная область $\Delta\lambda = 800 - 1000$ нм			
Радиус зеркальной сферы R_z , м	0,55	0,18	0,11	0,028
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 0,37$ с)	60.1145	6.4387	2.4046	0.1558
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 1$ с)	154.5440	16.5528	6.1818	0.4005
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 1,5$ с)	217.317	23.2763	8.6927	0.5632
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 2$ с)	267.9197	28.6962	10.7168	0.6944
Отношение сигнал/шум, q ($T_n = 20$ с)	460.6919	49.3435	18.4277	1.1940

Результаты расчетов для диффузной сферы

Результаты моделирования для диффузной сферы представлены в таблицах 12, 13, 14, 15.

Таблица 12 – Значения потока в электронах и отношения сигнал/шум для зенитного угла $\theta = 0$ градусов. Рассматриваемое время накопления $T_n = 0.37$ с

Зенитный угол θ гр	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм			
Радиус диффузной сферы R_z , м	0,55	0,18	0,11	0,028
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	5.2560	1.7201	1.0512	0.2676
Отношение сигнал/шум, q	305.8690	100.1026	61.1738	15.5715
	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 500$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	0.921	0.3014	0.1842	0.0469
Отношение сигнал/шум, q	53.5983	17.5413	10.7197	2.7286
	Спектральная область $\Delta\lambda = 500 - 600$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	1.3432	0.4396	0.2686	0.0684
Отношение сигнал/шум, q	78.1668	25.5819	15.6334	3.9794
	Спектральная область $\Delta\lambda = 600 - 800$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	2.3720	0.7763	0.4744	0.1208
Отношение сигнал/шум, q	138.0352	45.1751	27.6070	7.0272

	Спектральная область $\Delta\lambda = 800 - 1000$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	0.619	0.2028	0.1239	0.0316
Отношение сигнал/шум, q	36.0687	11.8043	7.2137	1.8362

Таблица 13 – Значения потока в электронах и отношения сигнал/шум для зенитного угла $\theta = 0$ градусов. Рассматриваемое время накопления $T_n = 1$ с

Зенитный угол 0 гр	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм			
Радиус диффузной сферы R_3 , м	0,55	0,18	0,11	0,028
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	14.205	4.649	2.841	0.723
Отношение сигнал/шум, q	786.3357	257.3462	157.2671	40.0316
	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 500$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	2.4892	0.8147	0.4978	0.1267
Отношение сигнал/шум, q	137.7919	45.0955	27.5584	7.0149
	Спектральная область $\Delta\lambda = 500 - 600$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	3.6303	1.1881	0.7261	0.1848
Отношение сигнал/шум, q	200.9533	65.7665	40.1907	10.2303
	Спектральная область $\Delta\lambda = 600 - 800$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	6.4107	2.0981	1.2821	0.3264
Отношение сигнал/шум, q	354.8643	116.1374	70.9729	18.0658
	Спектральная область $\Delta\lambda = 800 - 1000$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	1.6751	0.5482	0.3350	0.0853
Отношение сигнал/шум, q	92.7264	30.3468	18.5453	4.7206

Таблица 14 – Значения потока в электронах и отношения сигнал/шум для зенитного угла $\theta = 70$ градусов. Рассматриваемое время накопления $T_n = 0.37$ с

Зенитный угол 70 гр	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм			
Радиус диффузной сферы R_3 , м	0,55	0,18	0,11	0,028
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	4.2477	1.3902	0.8495	0.2162
Отношение сигнал/шум, q	247.192	80.8992	49.4384	12.5843
	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 500$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	0.6813	0.2229	0.1362	0.034
Отношение сигнал/шум, q	39.6481	12.9757	7.9296	2.0184
	Спектральная область $\Delta\lambda = 500 - 600$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	1.0945	0.3582	0.2189	0.0557
Отношение сигнал/шум, q	63.6915	20.8445	12.7383	3.2425
	Спектральная область $\Delta\lambda = 600 - 800$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	1.9816	0.6485	0.3963	0.1009
Отношение сигнал/шум, q	115.3205	37.7413	23.0641	5.8709

	Спектральная область $\Delta\lambda = 800 - 1000$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	0.4902	0.1604	0.098	0.024
Отношение сигнал/шум, q	28.5320	9.3377	5.7064	1.4525

Таблица 15 – Значения потока в электронах и отношения сигнал/шум для зенитного угла $\theta = 70$ градусов. Рассматриваемое время накопления $T_H = 1$ с

Зенитный угол 70 гр	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм			
Радиус диффузной сферы R_3 , м	0,55	0,18	0,11	0,028
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	11.480	3.757	2.296	0.584
Отношение сигнал/шум, q	635.4875	207.9777	127.0975	32.3521
	Спектральная область $\Delta\lambda = 400 - 500$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	1.8414	0.6026	0.3683	0.0937
Отношение сигнал/шум, q	101.9282	33.3583	20.3856	5.1891
	Спектральная область $\Delta\lambda = 500 - 600$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	2.9580	0.9681	0.5916	0.1506
Отношение сигнал/шум, q	163.7397	53.5875	32.7479	8.3358
	Спектральная область $\Delta\lambda = 600 - 800$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	5.3558	1.7528	1.0712	0.2727
Отношение сигнал/шум, q	296.4689	97.0262	59.2938	15.0930
	Спектральная область $\Delta\lambda = 800 - 1000$ нм			
Поток Фоб, в электронах, $1.0e+003$ *	1.3251	0.4337	0.2650	0.0675
Отношение сигнал/шум, q	73.3507	24.0057	14.6701	3.7342

Заключение

Проведенное моделирование фотометрического канала оптико-электронной системы ГЕОДСС показало следующее:

1. Оптико-электронная система способна обнаруживать зеркальную сферу диаметром 5,6 см на геостационарной орбите при времени накопления не менее $T_H=2$ с (обеспечивается требуемое отношение сигнал/шум 4-5), и зенитных углах наблюдения от 0 до 70 градусов в спектральной полосе $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм.

2. При работе оптико-электронной системы по зеркальной сфере обеспечиваются требуемые параметры обнаружения только в полосах Джонсона 400 – 500 нм, 500 – 600 нм и 600 – 800 нм. Наихудшие условия обнаружения складываются в полосе 800 – 1000 нм, где мала квантовая эффективность детектора SSID-16 ($\eta < 0,35$). Поэтому даже при $T_n \sim 50$ с условия обнаружения не соблюдаются.

3. Оптико-электронная система способна обнаруживать диффузную сферу (при фазовом угле $\varphi=0$) диаметром 5,6 см при времени накопления $T_n = 1$ с и зенитных углах наблюдения от 0 до 70 градусов в спектральной полосе $\Delta\lambda = 400 - 1000$ нм, что соответствует проникающей способности системы $m_v = 22$.

4. Оптико-электронная система эффективно работает в трех полосах Джонсона (400 – 500 нм, 500 – 600 нм, 600 – 800 нм), следовательно, получает спектральные характеристики космических объектов и может решать задачи их распознавания.

Библиографический список

1. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор – угроза человечеству. – М.: Изд-во Институт космических исследований РАН, 2012. - 192 с.
2. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93299>
3. Соколов Н.Л. Метод определения орбитальных параметров космического мусора бортовыми средствами космического аппарата // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=52950>
4. Ашурбейли И.Р., Лаговьер А.И., Игнатъев А.Б., Назаренко А.В. Возможности использования авиационной лазерной системы для борьбы с космическим мусором и поддержания орбит космического аппарата // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24856>
5. Баркова М.Е. Космический аппарат для утилизации космического мусора в околоземном пространстве // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100712>
6. Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И., Урличич Ю.М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. – М.: Машиностроение, 2014. – 736 с.
7. Королев В.О., Гудаев Р.А., Куликов С.В., Алдохина В.Н. Решение задачи распознавания типа объекта на основании использования диаграммы

направленности антенны в качестве признака // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81109>

8. Лавров В.Н. Аналитический обзор космических программ ДЗЗ России и зарубежных стран, ИнноТер, 2016. URL: <https://innoter.com/scientific-articles/1092>

9. Капелетти Ш., Гуардуччи Ф., Паолилло Ф., Ридолфи Л., Баттаглиере М.Л., Грациани Ф., Пьержентили Ф., Сантони Ф. Группировка микроспутников для обнаружения космического мусора // Труды МАИ. 2009. № 34. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=8237>

10. Space Surveillance Sensors: GEODSS (Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance) System, August 2012, available at: <https://mostlymissiledefense.com/2012/08/20/space-surveillance-sensors-geodss-ground-based-electro-optical-deep-space-surveillance-system-august-20-2012/>

11. Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) System, MITRE Poster, 2008, available at: http://www.fas.org/spp/military/program/track/geodss_poster.pdf

12. C. Max Williams and Sam D. Redford. GEODSS Upgrade Prototype System Program Status. Proceedings of the 1996 Space Surveillance Workshop, Lincoln Laboratory, 1996, pp. 99 – 108.

13. Дятлов В. Основные направления развития наземных оптоэлектронных средств контроля космического пространства США // Зарубежное военное обозрение. 2006. № 1. С. 50 – 55.

14. Дятлов В. Основные направления развития наземных оптоэлектронных средств контроля космического пространства США. Часть 2 // Зарубежное военное обозрение. 2006. № 2. С. 30 – 35.
15. Зиновьев Ю.С., Мишина О.А., Глущенко А.А. Перспективы развития оптических телескопов наземного и космического базирования // Труды МАИ. 2018. № 101.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=96976>
16. John R.Tower et al. Large Format Backside Illuminated CCD Imager for Space Surveillance // IEEE Transactions on Electron devices, 2003, vol. 50, no.1, pp. 218 - 224.
17. Турков В.Е., Ульянов С.А., Шаховской В.В., Поташов С.Ю. Технологии характеристики космических аппаратов для достижения космической ситуационной осведомленности США // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 11. С. 3 - 11.
18. Лазарев Л.П. Оптико-электронные приборы наведения. - М. : Машиностроение, 1989. - 512 с.
19. Здор С.Е., Чернов В.С. Влияние параметров оптико-электронных приборов на скорость обзора пространства // Оптико-механическая промышленность. 1985. Т. 52. № 7. С. 10 – 13.
20. Арутюнов В.А., Иванов В.Г., Каменев А.А., Прокофьев А.Е. Методика оценки потенциальных характеристик обнаружения малоразмерных аэрокосмических целей многоспектральной аппаратурой на матричных фотоприемниках // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2006. № 2. С. 47 - 69.

21. Грудзинский М.А. и др. Адаптивные телевизионные системы на ПЗС // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. 1984. № 5. С. 3 – 10.
22. Смелков В.М., Иванов С.А. Камеры с предельной чувствительностью на ПЗС // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. 1985. № 2. С. 26 – 32.