

УДК 621.384.326, 52-17

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С ПОМОЩЬЮ НЕОХЛАЖДАЕМОГО ИК-ДАТЧИКА С БОРТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

*Поташов С. Ю.<sup>1</sup>, Точёнов В. Н.<sup>2</sup>, Шаховский В. В.<sup>3</sup>*

OBSERVATION FEASIBILITY ASSESSMENT OF SPACE DEBRIS FRAGMENTS USING UNCOOLED  
SPACE BASED IR SENSOR

Potashov S. Yu., Tochyonov V. N., Shakhovskiy V. V.

Space debris detection range is assessed for a low-cost uncooled infrared sensor, located on-board a satellite. Commonly used models are applied with parameters intrinsic to modern space based microbolometers.

Keywords: IR-sensor, space debris, microbolometer.

### Введение

Как известно, острота проблемы космического мусора (КМ) постоянно увеличивается. Существующая система предупреждения о возможных столкновениях на орбите, базирующаяся на американской СККП (SSN), к сожалению из-за недостаточной точности и скорости отклика имеет низкую эффективность (50% правильного обнаружения при 50% ложных тревог [1]). Предлагаются различные варианты модернизации системы.

В литературе рассматривается концепция размещения бортовых оптических датчиков для собственной защиты космического аппарата (КА) от возможных столкновений и для уточнения элементов орбиты каталогизированных космических объектов [2]. Также рассматривается задача улучшенной характеристики орбитальных космических объектов (КО) для получения информации по их массе, форме и плотности, что позволит уточнить прогноз орбиты. Вторичные задачи характеристики включают измерение альбедо и композиции материалов поверхности, которые в комбинации с другими наблюдае-

мыми величинами помогут установить массу КО [3].

Для обеспечения непрерывности наблюдений подходит пассивный датчик, регистрирующий собственное тепловое излучение космических объектов в длинноволновом ИК-диапазоне (8–12(14) мкм), принимая во внимание, что равновесная температура орбитальных КО изменяется в пределах от 180 К в тени и до 240–500 К при солнечном освещении [4].

Например, прорабатывается проект COPPER (2012) применения коммерчески доступного микроболметра FLIR Tau 320 на борту CubeSat для исследования ИК-излучения земной атмосферы и океанов [5]. В качестве целей исследования также указываются космическая ситуационная осведомлённость (SSA), сервис на орбите и ДЗЗ (дистанционное зондирование Земли).

### 1. Цель работы и ограничения

Разработка методики и производство оценки дальности обнаружения элементов космического мусора различного размера с

<sup>1</sup>Поташов Сергей Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории Центрального научно-исследовательского института химии и механики; e-mail: cnt@cniihm.ru.

<sup>2</sup>Точёнов Владимир Николаевич, ведущий инженер Центрального научно-исследовательского института химии и механики; e-mail: cnt@cniihm.ru.

<sup>3</sup>Шаховский Валентин Владимирович, канд. техн. наук, заместитель начальника НИЦ нанотехнологий Центрального научно-исследовательского института химии и механики, доцент кафедры автоматизированных биотехнических систем Московского физико-технического института; e-mail: cnt@cniihm.ru.

Таблица 1. Значения вероятности обнаружения КО, попавшего в поле зрения ИК-датчика с соответствующими значениями отношения сигнал/шум для вероятности ложных тревог 1% [4]

Вероятность обнаружения, $P_{\text{обн}}$	90%	95%	97%
Требуемое отношение, С/Ш	5,4	10,2	16,0

помощью бортового неохлаждаемого ИК-датчика, имеющего параметры характерные для современных образцов, устанавливаемых на реальных КА.

Отметим, что из-за существенно меньшей дальности наблюдений КО по их собственному тепловому излучению в ИК-диапазоне, по сравнению с наблюдением в отражённом солнечном свете, относительная скорость наблюдаемого КО должна быть существенно меньше космической ( $< 100$  м/сек). В противном случае времени на манёвр уклонения КА просто не будет.

Для целей уточнения элементов орбиты КО или их характеристики слишком большие относительные скорости тоже не подходят, так чтобы угловая скорость перемещения наблюдаемого КО позволяла его отслеживать.

## 2. Методика расчёта

Обычно для систем тепловидения оценка их возможностей производится основываясь на минимально разрешимой температуре (MRT). Здесь учитывается температурный контраст по отношению к фону необходимый для разрешения 4-х полосной мины [2].

Однако для задач обнаружения такой подход не применим, так как обычно имеет дело с неразрешёнными (точечными) объектами на космическом фоне, яркость которого пренебрежимо мала. В этом случае для наблюдения КО важен не столько контраст, сколько отношение сигнала от наблюдаемого объекта к сигналу, вызванному собственными шумами ИК-датчика. При этом используются такие его характеристики как эквивалентная шуму мощность ( $NEP$ ) и эквивалентная шуму температурная разность ( $NETD$ ), обычно указываемая в паспортах фирм изготовителей.

Вероятность  $P_{\text{обн}}$  обнаружения оптических сигналов на фоне шумов, распределённых по законам Гаусса и Пуассона, описывается с помощью флуктуационной теории [6]. Так как нас интересует максимальная дальность обнаружения КО в режиме наблюде-

ний на фоне звёздного неба, то мы имеем дело с обнаружением на фоне независимых от сигнала шумов, имеющих гауссово распределение, вероятность которого является однозначной функцией отношения сигнала к шуму, если остальные параметры качества изображения остаются постоянными. Для практических целей в табл. 1 указаны следующие значения  $P_{\text{обн}}$  с соответствующими значениями требуемого отношения С/Ш при вероятности ложных тревог 1% [4].

Важно отметить, что выше речь шла о вероятности обнаружения  $P_{\text{обн}}$  объекта уже попавшего в поле зрения (FOV) оптоэлектронного датчика. Оценка полной вероятности обнаружения должна учитывать вопрос попадания объекта обнаружения в это поле зрения.

Чтобы перейти к величине максимальной дальности до объекта наблюдения, используем радиометрические вычисления и рассмотрим выражение для отношения С/Ш на элементе матричного фотоприёмника, чувствительность которого ограничена собственными шумами через эквивалентную шуму мощность ( $NEP$ ) [7]. При этом формула модифицирована с учётом влияния накопления кадров и эффекта рассеяния мощности пятна изображения точечного источника на пикселях матрицы ФПУ

$$\frac{C}{\Pi} = \frac{k_{\text{расс}} \sqrt{n_{\text{кадр}}} I_{\Delta\lambda} \tau_{\text{атм}} \tau_{\text{опт}} A_{\text{кам}}}{R^2 NEP}. \quad (2.1)$$

Здесь  $I_{\Delta\lambda}$  — сила излучения объекта в заданном спектральном диапазоне чувствительности фотодетектора,  $\tau_{\text{опт}}$  — коэффициент пропускания оптики (0,85),  $\tau_{\text{атм}}$  — коэффициент пропускания атмосферы (для космических наблюдений равен 1),  $k_{\text{расс}}$  — коэффициент рассеяния точечного изображения объекта на приёмных элементах матрицы фотоприёмного устройства (ФПУ) (в случае распределения мощности на 4-х пикселях равен 0,167),  $n_{\text{кадр}}$  — количество накапливаемых кадров,  $A_{\text{кам}}$  — площадь входного зрачка объектива ИК-камеры ( $\frac{\pi D_o^2}{4}$ , где  $D_o$  — его апертура),  $NEP_{\Delta\lambda}$  — эквивалентная шуму мощность в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda$ ;  $R$  — дальность до объекта.

Искомая максимальная дальность  $R$  определяется из (2.1) для порогового отношения С/Ш, задаваемого требуемой вероятностью обнаружения  $P_{\text{обн}}$ . Значение  $NEP$  удобно использовать, так как для данной камеры оно не зависит от параметров объекта ( $F$ ), а только от параметров ФПУ. Для его вычисления используем значение  $NETD$ , обычно указываемого в паспорте фирмами-изготовителями для температуры фона 300К и  $F/1$ , в соответствии с соотношениями [7]

$$NEP = \frac{\sqrt{A_{\text{пикс}} \Delta f}}{D^*},$$

$$NETD = \frac{4}{\pi} \frac{F^2 \sqrt{\Delta f}}{D^* \sqrt{A_{\text{пикс}}} (\partial L / \partial T)_{\Delta \lambda}}. \quad (2.2)$$

Здесь  $D^*$  — удельная обнаружительная способность элемента матрицы ФПУ,  $A_{\text{пикс}}$  — площадь элемента матрицы (пикселя) ФПУ,  $F$  — диафрагменное число оптики ( $f/D_0$ ),  $\Delta f$  — шумовая полоса частот,  $(\partial L / \partial T)_{\Delta \lambda}$  — температурный контраст спектральной плотности яркости объекта наблюдения в диапазоне  $\Delta \lambda$  (определяющий температурную зависимость  $NETD$ ).

Оценив  $NEP$  через  $NETD$  по (2.2), получаем выражение для искомой максимальной дальности

$$R^2 = \frac{k_{\text{расс}} \sqrt{n_{\text{кадр}}} I_{\Delta \lambda} \tau_{\text{опт}} \tau_{\text{атм}} A_{\text{кам}}}{NEP (C/Ш)_{P_{\text{обн}}}}. \quad (2.3)$$

### 2.1. Излучение наблюдаемого КО

При вычислении силы излучения объекта  $I_{\Delta \lambda}$  (в заданном спектральном диапазоне чувствительности фотодетектора  $\Delta \lambda$ ), имеющего температуру  $T_{\text{КО}}$  и площадь видимой поверхности  $A_{\text{КО}}$  будем исходить из простейшего случая ламбертовского источника, имеющего среднее значение излучательной способности  $\varepsilon$  по поверхности КО серого тела:

$$I_{\Delta \lambda} = L_{\Delta \lambda} A_{\text{КО}} = \frac{M_{\Delta \lambda \text{ЧТ}}}{\pi} = \frac{\varepsilon A_{\text{КО}}}{\pi} \int_{\Delta \lambda} M_{\Delta \lambda \text{ЧТ}} d\lambda, \quad (2.4)$$

где  $M_{\Delta \lambda \text{ЧТ}}$  — спектральная плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела (излучаемая в полуплоскость), вычисляемая по известной формуле Планка (для температуры  $T_{\text{КО}}$ ).

Температурный контраст яркости в спектральном диапазоне  $\Delta \lambda$  для температуры  $T_{\text{КО}}$  находим проинтегрировав  $M_{\Delta \lambda \text{ЧТ}}$  (с учётом того, что для ламбертовского источника  $L=M/\pi$ ). Получим, что

$$(\partial L / \partial T)_{\Delta \lambda} = \frac{1}{\pi} \frac{\partial}{\partial T} \int_{\Delta \lambda} M_{\Delta \lambda \text{ЧТ}} d\lambda. \quad (2.5)$$

### 2.2. Объектив и фотоприёмная матрица

Из (2.3) явствует, что с точки зрения дальности обнаружения выгоднее брать фотоприёмные матрицы с минимальным размером пикселя и минимальным значением чувствительности  $NETD$ . Для передовых микроболометрических матриц характерный размер приемных элементов — 17 и 25 мкм,  $NETD \sim 50$  мК, а формат матриц —  $640 \times 480$  и  $1024 \times 768$  элементов.

В формуле (2.3) также имеются параметры, определяемые оптическими свойствами объектива, используемого в данной ИК-камере. Это диаметр входного зрачка  $D_0$ , определяющий его площадь  $A_{\text{кам}}$ , который связан с его диафрагменным числом. Обычно для данной матрицы производители предлагают линейку из объективов отличающихся этими параметрами, которые, среди прочего, влияют на поле зрения  $FOV$ . Чтобы обеспечить заданное его значение при уменьшении размера пикселей, требуется адекватное увеличение их количества для сохранения размера  $d$  матрицы (поскольку  $FOV \approx d/f$ ). Отметим, что для работы в поисковом режиме выгодно иметь камеру с большим полем зрения, например,  $8^\circ \times 10^\circ$ , так как при том же времени экспозиции кадра это повышает вероятность попадания объекта в поле зрения датчика.

Массу камеры можно снизить, уменьшив диаметр объектива посредством увеличения диафрагменного числа до определённого предела при тех же значениях  $FOV$  и, следовательно, фокуса  $f$ . Дальнейшее увеличение диафрагменного числа (больше 1,6) с целью уменьшения апертуры не имеет смысла, так как из-за относительно умеренной чувствительности микроболометров резко падает чувствительность камеры и, следовательно, дальность обнаружения. Из-за этого их используют исключительно со светосильной оптикой (с диафрагменным числом порядка 1 и меньше (до 0,6) и, как правило, не больше 1,6).

Таблица 2. Характеристики камеры Photon 640

Параметры матрицы камеры	
Спектральный диапазон, мкм	7,5–13,5 (LWIR)
Количество элементов	644×512
Размер элемента, мкм	25
NETD (@ F/1, 300K)	< 35 мК (при кадровой частоте 25–30 Гц)
Параметры камеры	
Количество разрядов АЦП	14
Варианты частоты кадров, Гц	7 / 8 / 25 / 30
Напряжение питания, В	+7 ... +14
Потребляемая мощность	< 3,0 Вт (в установившемся состоянии)
Конструктивное исполнение	Негерметичный металлический корпус. Возможно бескорпусное исполнение
Габариты (без объектива и ответных частей разъёмов), мм	32×63,5×61,7
Температурный диапазон	Рабочий — $-40^{\circ}\dots +80^{\circ}\text{C}$ . Хранения — $-50^{\circ}\dots +85^{\circ}\text{C}$ (необразование конденсата при влажности от 5% до 95 %)

В качестве возможного варианта бортового оптического датчика была рассмотрена микроболометрическая ИК камера Photon 640 (американской фирмы FLIR Inc.) [8]. Её краткие характеристики приведены в табл. 2.

Оценку чувствительности камеры с использованием трёх широкоугольных объективов той же фирмы с относительными отверстиями 1:1.6, 1:1.25 и 1:1.1 мы произвели ( $\tau_{\text{опт}} = 0,85$ ) в соответствии с соотношениями (2.3) и (2.4) (табл. 3).

### 3. Результаты расчётов

Оценка дальности обнаружения ( $R$ ) элементов космического мусора различного размера, материала поверхности (излучательной способности  $\varepsilon$ ) и температуры производилась для камеры Photon 640 с использованием трёх вышеописанных объективов в соответствии с формулой (2.3) для вероятности обнаружения 95% и вероятности ложной тревоги 1%, то есть для порогового отношения  $C/\text{Ш} = 10,2$  (табл. 2), для одного кадра накопления и коэффициента  $k_{\text{расс}}$  рассеяния пятна изображения по пикселям 1,0.

Что касается равновесной температуры  $T_{\text{КО}}$  объекта, находящегося на околоземной орбите, которую следует использовать в формулах (2.4) и (2.5), то она зависит от отношения его отражательной способности  $\alpha_V$  усреднённой по видимому диапазону волнового спектра к излучательной способности  $\varepsilon_{\text{IR}}$ , усреднённой по ИК-диапазону [4], а так-

же от формы объекта, а точнее от отношения его поперечного сечения  $A_C$  к площади поверхности  $A_S$

$$T \sim \sqrt[4]{\frac{\alpha_V A_C}{\varepsilon_{\text{IR}} A_S}}.$$

Наибольшее значение (1/4) отношение  $A_C/A_S$  имеет для сферы, поэтому несферические объекты будут менее нагретыми. Кроме того, для последних имеет значение ракурс наблюдения. При этом условия дневного освещения и ночной тени имеют качественное отличие. В последнем случае зависимость равновесной температуры от  $\alpha_V/\varepsilon_{\text{IR}}$  вырождается и все сферические объекты имеют среднюю температуру около 180 К. Для случая дневного освещения равновесная температура сферических объектов, покрытых различными материалами, применяющимися в космосе, приведена в табл. А-1 в [4]. Она изменяется от 227 К для белой  $\text{TiO}_2$  краски ( $\varepsilon_{\text{IR}}=0,94$ ) до 540 К для полированной золотой пластины ( $\varepsilon_{\text{IR}}=0,028$ ). Для этих двух крайних случаев излучательной способности в условиях дня и ночи были проведены расчёты (рис. 1) максимальной дальности наблюдений, и таким образом обозначен диапазон изменения этой величины для указанного спектра материалов. В этом расчёте был использован вариант 1 камеры с максимальной апертурой (62,48 мм).

Для сравнения микроболометров с тремя упомянутыми в табл. 3 вариантами (1–3)

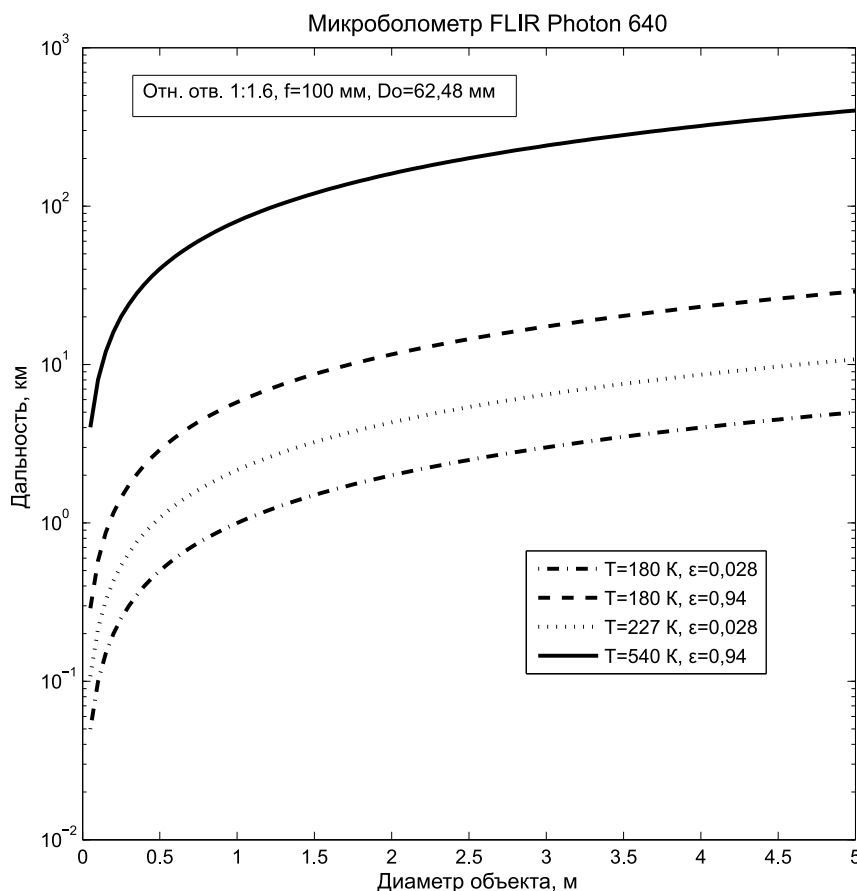


Рис. 1. Дальность обнаружения элементов КМ сферической формы, имеющих различные значения излучательной способности  $\epsilon$  и равновесной температуры ( $T$ ) в зависимости от их размера (диаметра) с помощью микроболлометра FLIR Photon 640 для объектива  $f = 100$  мм ( $\varnothing 62,48$  мм). Вероятность обнаружения 95% при вероятности ложной тревоги 1%

Таблица 3. Оценка чувствительности камеры Photon 640 для различных объективов

	Мгновенное поле зрения	Поле зрения/ формат	$NETD$ ( $T_{\text{фона}} = 300$ К)	$NETD$ (для отн. отв. 1:1, $T_{\text{фона}} = 300$ К)	$NEP$	$D^*$
1	0,25 мрад (51 угл. сек)	$9 \times 8^\circ$ 640×512	94 мК	35 мК	$1,5 \times 10^{-11}$ Вт	$1,17 \times 10^9$ Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup>
	Приведенные выше данные для объектива: $f = 100$ мм; $D_o = 62,48$ мм; отн. отверстие 1:1,6. Вес камеры фирмы FLIR (с объективом 100 мм) 631 г; габариты 152,7×82×82 мм					
2	0,417 мрад (86 угл.сек)	$15 \times 12^\circ$ 640×512	58 мК	35 мК	$1,5 \times 10^{-11}$ Вт	$1,17 \times 10^9$ Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup>
	Приведенные выше данные для объектива: $f = 60$ мм; $D_o = 48$ мм; отн. отверстие 1:1,25. Вес камеры фирмы FLIR (с объективом 60 мм) 317 г; габариты 97,5×63,5×61,7 мм.					
3	0,51 мрад (105 угл.сек)	$19 \times 15^\circ$ 640×512	43 мК	35 мК	$1,5 \times 10^{-11}$ Вт	$1,17 \times 10^9$ Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup>
	Приведенные выше данные для объектива: $f = 49$ мм; $D_o = 45,2$ мм; отн. отверстие 1:1,1. Вес камеры фирмы FLIR (с объективом 49 мм) 498 г; габариты 111,8×65,8×61,7 мм.					

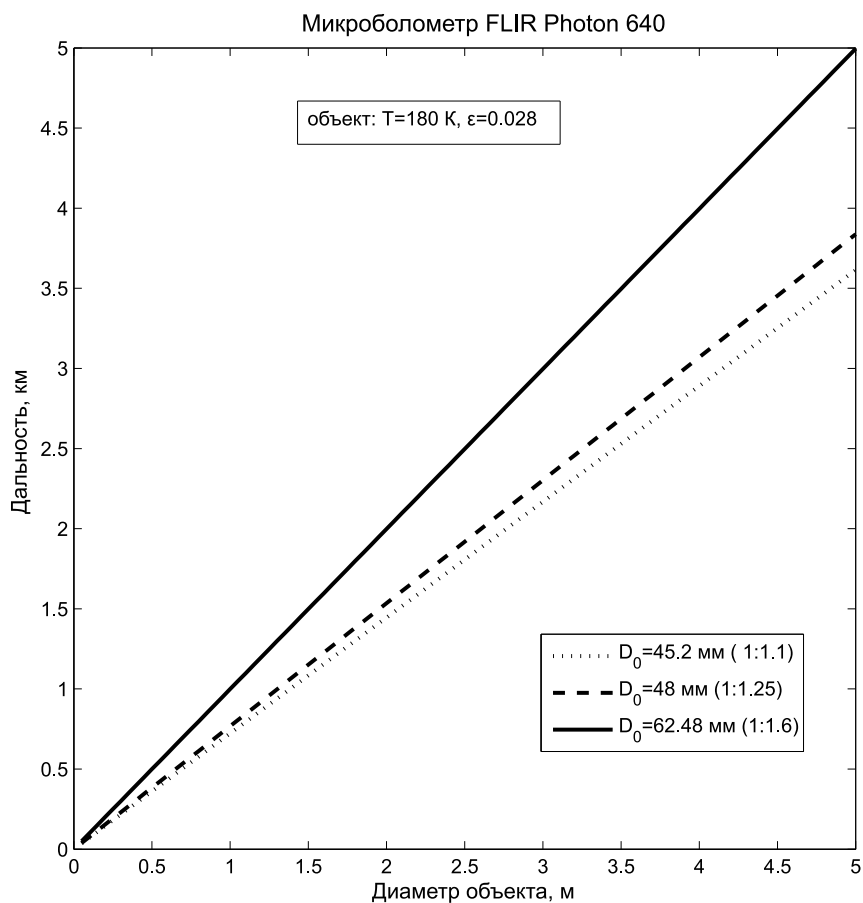


Рис. 2. Дальность обнаружения элементов КМ сферической формы, имеющих температуру 180 К и излучательную способность 0,028 в зависимости от их размера (диаметра) с помощью микроболюметра FLIR Photon 640 для трёх объективов с диаметром входного зрачка  $D_0$

объективов был проведен расчёт для условий наименьшей заметности наблюдаемых обломков КМ, т.е. для ночной равновесной температуры 180 К и излучательной способности 0,028, характерной для золотой пластины (рис. 2).

Понятно, что лучшим вариантом объектива камеры по обеспечиваемой дальности обнаружения является вариант 1 (отн. отверстие 1:1,6). Вариант 3 (отн. отверстие 1:1,1), несмотря на большой, чем у варианта 2 вес, имеет самую высокую чувствительность (*NETD*), т.е. лучшее качество изображения и самое большое поле зрения при практически одинаковых дальностях обнаружения с вариантом 2 (отн. отверстие 1:1,25), который имеет самый малый вес и габариты. Оптимальный выбор варианта камеры будет зависеть от конкретно поставленной задачи.

Отметим, что в соответствии с формулой (2.3) для выбранной камеры имеется возможность увеличивать дальность обнаружения за счёт наращивания количества накаплива-

емых кадров (правда, зависимость довольно слабая), а также за счёт уменьшения требуемого отношения С/Ш (при этом, естественно, уменьшается вероятность обнаружения).

### Заключение

Проведены оценки дальности обнаружения обломков КМ, имеющих различный материал поверхности и размеры с помощью одной из передовых коммерчески доступных моделей микроболюметра — Photon 640. Сделано сравнение различных объективов, применяемых в данной модели камеры, с точки зрения выполнения поставленной задачи.

### Литература

1. *Weeden B.* Going Blind: Why America is on the Verge of Losing its Situational Awareness in Space and What Can be Done About it. Secure World Foundation, 2012. 51 p.

2. *Dawson James A., et al.* Analytical modeling of space-based thermal imaging systems. AMOS Conference. 2009. 9 p.
3. *Dawson James A., et al.* Space debris characterization using thermal imaging systems. AMOS Conference. 2010. 11 p.
4. *Andrew M. Sessler, et al.* Countermeasures. A Technical Evaluation of the Operational Effectiveness of the Planned US National Missile Defense System. Union of Concerned Scientists, April 2000. 200 p.
5. *Massey S.* COPPER: IR Imaging and Radiation Studies. CubeSat Developer's Workshop. Summer 2011. Saint Louis University. 31 p.
6. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
7. *Daniels A.* Field guide to infrared systems. The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2007. 135 p.
8. Photon 640. Thermal imaging core with uncooled detector producing ultra sharp images of 644×512 pixels. Technical specifications. 2009, FLIR Systems, Inc. 8 p.

Ключевые слова: ИК-датчик, космический мусор, микроболометр.

---

Статья поступила 8 октября 2013 г.

Центральный научно-исследовательский институт химии и механики, г. Москва  
Московский физико-технический институт, г. Москва

© Поташов С. Ю., Точёнов В. Н., Шаховский В. В., 2013