

УДК 681.5

## МОДЕЛЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

С. В. Артамонов, Б. П. Мухачев, И. И. Шанин  
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Приводится описание состава математической модели оптико-электронной следящей системы космического аппарата, назначение, взаимосвязь и способы моделирования элементов модели.

*Ключевые слова:* космический летательный аппарат, математическая модель, следящая система, фотоприемное устройство, фоточувствительная ячейка, оптическая система, внутрикадровая обработка, калибровка, оконтуривание, формирование порога, пороговая обработка.

### Введение

Для управления движением космического летательного аппарата (КЛА) и решения различных задач по исследованию космического пространства требуется информация как о параметрах движения самого аппарата, так и о явлениях в окружающей его среде. Эта информация может быть получена при помощи измерений, основанных на использовании различных физических принципов. Наряду с радиотехническими системами все более широкое применение находят приборы, основанные на использовании излучений оптического и инфракрасного (ИК) диапазонов электромагнитного спектра. К ним относятся все приборы оптико-электронной автоматики, системы самонаведения, измерительные оптико-электронные приборы, а также оптико-электронные следящие системы (ОЭСС). Широкое распространение ОЭСС объясняется их высокой разрешающей способностью, а также возможностью создания на базе использования оптического и ИК диапазонов электромагнитного излучения систем с избыточной информацией, обладающих повышенной помехоустойчивостью.

Постепенное усложнение задач, расширение круга применения привели к заметному усовершенствованию ОЭСС. Изменились и методы их математического и экспериментального исследования. В связи с известными трудностями проведения достаточно информативного натурального эксперимента обнаруживается тенденция получения подробной информации о характеристиках ОЭСС в лабораторных условиях, а также путем аналитического исследования и математического моделирования. Таким образом, непременным условием исследования ОЭСС является разработка математической модели.

При создании математической модели авторы не стремились к подробному описанию устройств разнообразных следящих систем конкретного типа и их элементов, ограничившись наиболее общей структурной схемой. Предлагаемая математическая модель ОЭСС состоит из следующих частных моделей: окружающей среды<sup>1</sup>, оптического тракта, матричного несканирующего фотоприемного устройства (ФПУ) ОЭСС КЛА и алгоритмов первичной обработки кадров изображений на ФПУ ОЭСС КЛА. В частную модель окружающей среды ОЭСС КЛА включены следующие объекты: объект наблюдения, Земля, Солнце, Луна, звездное небо.

Подробное описание систем координат, которые используются в модели ОЭСС КЛА, дано в работе [1].

<sup>1</sup>Объекты и материальные сущности, с которыми моделируемый элемент осуществляет информационное или физическое взаимодействие, но на которые не распространяются команды командно-вычислительного пункта рассматриваемой системы.

## Описание окружающей среды

**Объект наблюдения.**

*Расчет положения объекта наблюдения.* Положение объекта в пространстве для каждого момента времени наблюдения  $t$  задается координатами центра масс  $r_{\text{цмГИСК}}$  и ориентацией связанных осей координат объекта наблюдения в геоцентрической (гринвичской) инерциальной системе координат (ГИСК) (рис. 1).

*Модель для расчета изображения объекта наблюдения.* Для расчета изображения объекта наблюдения на матрице ФПУ ОЭСС КЛА поверхность объекта разбивается на facets (рис. 2). Для каждого facets вычисляются в связанной системе координат (ССК) координаты его геометрического центра  $\mathbf{r}_{i\text{ССК}}^0 = (x_i^0; y_i^0; z_i^0)_{\text{ССК}}$  и нормаль  $\mathbf{N}_{i\text{ССК}}^0 = (N_{xi}^0; N_{yi}^0; N_{zi}^0)_{\text{ССК}}$  к этому центру (рис. 3). Разбиение поверхностей объектов наблюдения на facets может проводиться по индивидуальному для каждой формы объекта алгоритму либо с помощью интегрированных пакетов программ, например 3ds Max 8.0.

Каждый facets считается точечным источником собственного и отраженного излучений. Яркость собственного теплового излучения  $i$ -го facets определяется формулой

$$B_i = \frac{1}{\pi} \left( \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon_{si}(\lambda) \frac{2\pi h_p c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{h_p c}{\lambda k T (dS_i)}\right) - 1} d\lambda \right) [\text{Вт/м}^2], \quad \text{или}$$

$$B_i = \frac{1}{\pi} \left( \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon_{si}(\lambda) \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{\exp\left(\frac{h_p c}{\lambda k T (dS_i)}\right) - 1} d\lambda \right) [\text{фотон/с/м}^2],$$

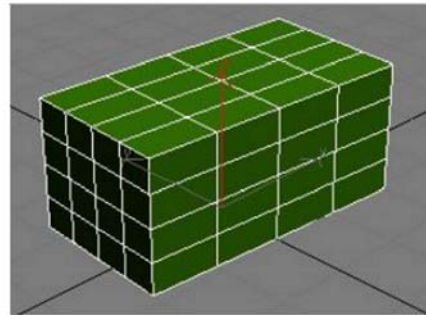
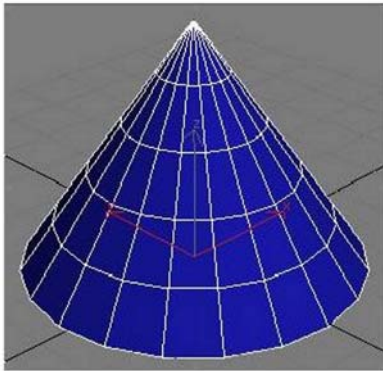


Рис. 2. Примеры facетной модели поверхности объекта наблюдения

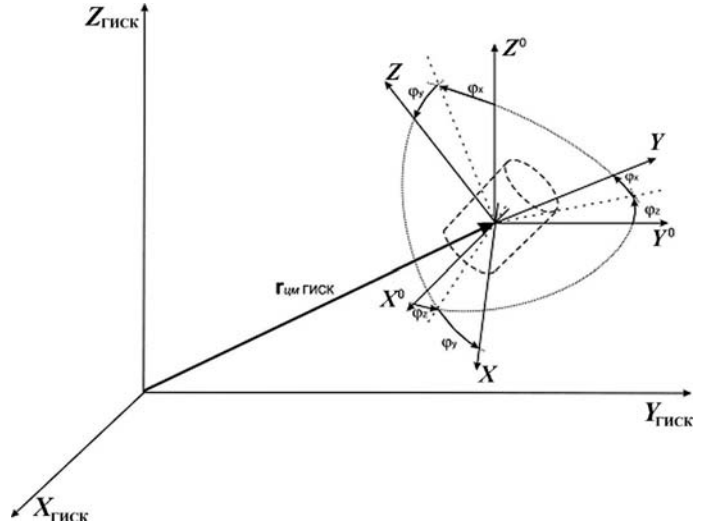


Рис. 1. Положение элемента объекта наблюдения в пространстве:  $r_{\text{цмГИСК}}$  — радиус-вектор центра масс объекта в ГИСК для текущего момента времени  $t$ ;  $X^0 Y^0 Z^0$  — начальная ориентация ССК объекта относительно ГИСК;  $XYZ$  — текущая ориентация ССК объекта относительно ГИСК;  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  — углы ориентации ССК объекта относительно ГИСК на момент времени  $t$

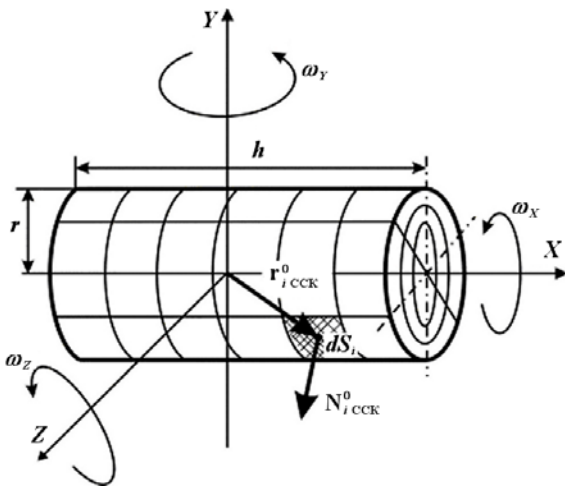


Рис. 3. ССК и факетная модель объекта наблюдения:  $r$  — радиус основания кругового цилиндра;  $h$  — высота цилиндра;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  — угловые скорости вращения вокруг соответствующих осей ССК;  $dS_i$  — площадь факета

где  $h_p$  — постоянная Планка;  $k$  — постоянная Больцмана;  $c$  — скорость света;  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  — спектральный диапазон излучения;  $T(dS_i)$  — абсолютная температура поверхности  $i$ -го факета, функция от координат поверхности объекта наблюдения;  $\varepsilon_{s_i}(\lambda)$  — спектральный коэффициент излучения поверхности  $i$ -го факета.

**Суммарный поток излучения, падающий на поверхность объекта наблюдения.** Определение освещенности поверхности объекта наблюдения проводится с помощью методики, описанной в [1]. По этой методике суммарный поток излучения  $q_S(t)$  от внешних источников, падающий на поверхность объекта, ищется как сумма потоков от отдельных источников:

$$q_S(t) = q_S^C(t) + q_S^3(t) + q_{\text{рас}}^C(t) + q_S^{\text{Л}}(t),$$

где  $q_S^C(t)$ ,  $q_S^3(t)$ ,  $q_{\text{рас}}^C(t)$ ,  $q_S^{\text{Л}}(t)$  — потоки излучения, падающие на поверхность объекта наблюдения от Солнца, Земли, земной атмосферы и Луны соответственно.

**Модель звездного неба.** Для построения изображения на ФПУ ОЭСС КЛА звездного фона используется карта звездного неба. При расчетах излучения от объекта наблюдения излучение звезд не учитывается.

### Модель ОЭСС КЛА

При моделировании работы ОЭСС КЛА выполняется следующая последовательность действий:

- расчет освещенности ячеек ФПУ;
- моделирование накопления и считывания зарядов в ячейках ФПУ;
- формирование списка точечных объектов со своими координатами и интегральной яркостью.

Модель ОЭСС КЛА составляют:

- модель оптического тракта;
- модель ФПУ;
- алгоритмы внутрикадровой обработки.

**Модель оптического тракта.** Предназначена для расчета освещенности ячеек ФПУ. Центр каждого факета поверхности объекта наблюдения по правилам геометрической оптики отображается на матрицу ФПУ. Модель оптической системы приемника — тонкая бесконечная линза с заданным диаметром  $D_{\text{л}}$  и фокусным расстоянием  $f$ . Потери энергии лучистого потока в оптической системе учитываются с помощью коэффициента потерь. Геометрические аберрации (сферическая аберрация, кома, дисторсия, астигматизм и кривизна поля) не учитываются. Из искажений в оптической системе моделируется только дифракция на зрачке. Получаемая дифракционная картина, называемая *кружком Эри*, имеет круговую симметрию с максимальной амплитудой в центре, окруженной кольцами чередующихся нулевых и убывающих по величине амплитуд. В центральном максимуме заключено почти все излучение; размер же пятна изображения определяется радиусом  $r_0$ . Авторы ограничились вторым *темным* кольцом, соответствующим второму нулю функции Бесселя.

Таким образом, на матрице фотоприемников имеются "размытия", или так называемые *световые пятна* с различной интенсивностью. Сумма освещенностей световых пятен формирует поле

освещенности ФПУ. Освещенность каждой ячейки ФПУ рассчитывается с учетом *слепых зон*<sup>2</sup> и технологических зазоров на матрице ФПУ.

**Модель ФПУ.** Предназначена для моделирования накопления и считывания зарядов в ячейках ФПУ. Используются модели двух видов фоточувствительных ячеек (ФЧЯ) — интегральной и гибридной. Подробное описание интегральной ФЧЯ дано в [2]. Описание гибридной ФЧЯ приводится в [3].

Некоторые характеристики интегральной и гибридной ФЧЯ, обычно не указываемые в источниках, ищутся с помощью разработанных авторами оптимизационных алгоритмов. Так, для интегральной ФЧЯ необходимые для моделирования процесса накопления фототока в ФЧЯ ширина электродов  $x_1$  и  $x_2$ , время накопления фотосигнала  $t_{in}(t)$  и максимально возможная вероятность обнаружения  $P_{обн}$  для требуемой дальности обнаружения и угловой скорости линии визирования находятся с помощью методики, которая подробно описана в [2]. Для гибридной ФЧЯ эта методика несколько модифицирована.

**Алгоритмы внутрикадровой обработки.** Это неотъемлемая часть системы управления ОЭСС КЛА. Назначение алгоритмов — сформировать список точечных объектов со своими координатами и интегральной яркостью. Координаты точечных объектов  $\mathbf{r}_{i\text{np}}$  и компоненты векторов нормалей  $\mathbf{N}_{i\text{np}}$  определяются в системе координат ФПУ из формул (рис. 4)

$$\mathbf{r}_{i\text{np}} = C(\varphi_7; \varphi_8; \varphi_9) [C^T(\varphi_4; \varphi_5; \varphi_6) (\mathbf{r}_{\text{цмГИСК}} - \mathbf{r}_{\text{цмКЛА ГИСК}} + C(\varphi_1; \varphi_2; \varphi_3) \mathbf{r}_{i\text{ССК}}^0) - \mathbf{r}_{\text{фм}}];$$

$$\mathbf{N}_{i\text{np}} = C(\varphi_7; \varphi_8; \varphi_9) C^T(\varphi_4; \varphi_5; \varphi_6) C(\varphi_1; \varphi_2; \varphi_3) \mathbf{N}_{i\text{ССК}}^0.$$

Здесь  $\mathbf{r}_{\text{цмГИСК}}$ ,  $\mathbf{r}_{\text{цмКЛА ГИСК}}$  — векторы, определяющие положения центров масс соответственно объекта наблюдения и КЛА в ГИСК;  $C(\varphi_1; \varphi_2; \varphi_3)$  — матрица перехода от ССК объекта наблюдения к ГИСК;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  — углы, определяющие положение ССК объекта наблюдения относительно ГИСК;  $C^T(\varphi_4; \varphi_5; \varphi_6)$  — матрица перехода от ГИСК к ССК КЛА;  $\varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$  — углы, определяющие ориентацию ССК КЛА относительно ГИСК;  $C(\varphi_7; \varphi_8; \varphi_9)$  — матрица перехода от ССК КЛА к ССК ФПУ;  $\varphi_7, \varphi_8, \varphi_9$  — углы ориентации орт ССК ФПУ относительно ССК КЛА;  $\mathbf{r}_{\text{фм}}$  — вектор, определяющий положение начала координат ССК ФПУ (точка пересечения оптической оси с фокальной

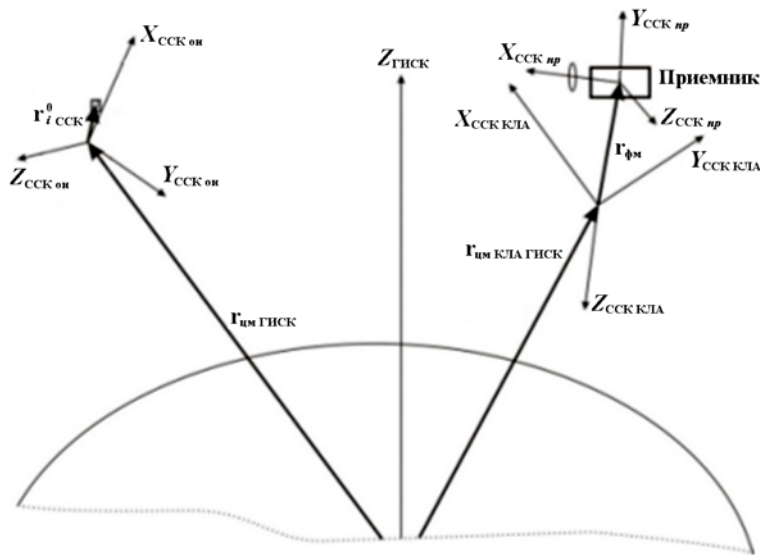


Рис. 4. К определению компонент векторов  $\mathbf{r}_{i\text{np}}$  и  $\mathbf{N}_{i\text{np}}$  ( $X_{\text{ССК}_{он}}$ ,  $Y_{\text{ССК}_{он}}$ ,  $Z_{\text{ССК}_{он}}$  — орты ССК объекта наблюдения)

<sup>2</sup>Зоны нечувствительности ячейки к падающему на нее потоку излучения.

плоскостью) в ССК КЛА. Матрица  $C(\varphi_x; \varphi_y; \varphi_z)$  ( $x = 1, 4, 7; y = 2, 5, 8; z = 3, 6, 9$ ) имеет следующий вид:

$$C(\varphi_x; \varphi_y; \varphi_z) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_y \cos \varphi_z & -\cos \varphi_y \sin \varphi_z \cos \varphi_x + \sin \varphi_y \sin \varphi_x & \cos \varphi_y \sin \varphi_z \sin \varphi_x + \sin \varphi_y \cos \varphi_x \\ \sin \varphi_z & \cos \varphi_z \cos \varphi_x & -\cos \varphi_z \sin \varphi_x \\ -\sin \varphi_y \cos \varphi_z & \sin \varphi_y \sin \varphi_z \cos \varphi_x + \cos \varphi_y \sin \varphi_x & -\sin \varphi_y \sin \varphi_z \sin \varphi_x + \cos \varphi_y \cos \varphi_x \end{pmatrix}.$$

В процессе внутрикадровой обработки решаются следующие задачи:

- калибровка оцифрованных напряжений элементов матриц ФПУ;
- формирование порога;
- пороговая обработка кадра. Результатом обработки является матрица яркостей пикселей, часть которых имеют ненулевые значения (соответствуют точечным излучающим объектам), а большинство — нулевые (соответствуют фоновым засветкам);
- *оконтуривание* односвязных областей, содержащих ненулевые пиксели;
- построение списка точечных объектов. Результатом является список выделенных точечных объектов со своими координатами и интегральной яркостью.

*Алгоритм калибровки.* Предназначен для выравнивания чувствительности элементов матрицы ФПУ ОЭСС КЛА и учета темновых токов. В соответствии с алгоритмом оценка сигнала (напряжения) равна

$$u_{ij} = k_{ij} (u_{ij}^* - u_{ij}^t),$$

где  $k_{ij}$  — калибровочный коэффициент;  $u_{ij}^*$  — оцифрованное значение измеренного напряжения пикселя матрицы ФПУ;  $u_{ij}^t$  — напряжение темнового тока пикселя;  $i, j$  — номера строки и столбца пикселя соответственно.

Оценка параметров темновых токов проводится при закрытой крышке ОЭСС путем многократного включения ОЭСС. Калибровочные коэффициенты рассчитываются по юстировочному излучателю непосредственно перед рабочим циклом ОЭСС.

*Алгоритм формирования порога.* Для измеренного кадра определяются статистические параметры сигналов матрицы ФПУ (математическое ожидание  $m$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ ) по следующим соотношениям:

$$m = \frac{\sum u_{ij}}{N}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (u_{ij} - m)^2}{N}},$$

где суммирование ведется по всем  $N$  пикселям. Рассчитывается значение порога

$$h_{\text{пор}} = m + \alpha \sigma.$$

Значение  $\alpha$  выбирается из условия, при котором обеспечивается оптимальное соотношение вероятностей обнаружения и ложного срабатывания, и составляет  $\alpha = 2 \div 3$ .

*Алгоритм пороговой обработки.* Если  $u_{ij} \leq h_{\text{пор}}$ , то  $u_{ij}^0 = 0$ , иначе  $u_{ij}^0 = u_{ij}$ .

В результате пороговой обработки формируется массив объектов, яркость которых превысила порог (их число может достигать несколько тысяч). При этом отсекаются шумовая составляющая и отметки от *неярких* звезд либо иных ложных объектов.

В соответствии с предельной чувствительностью ФЧЯ в число объектов, превышающих порог обнаружения, входят все звезды и иные объекты яркостью до  $10 \div 12$  звездной величины. Пороговая обработка проводится для каждого кадра измерений.

*Алгоритм "оконтуривания" отметок от объектов.* Ввиду неидеальности оптической системы ОЭСС КЛА, конечных угловых размеров объекта наблюдения, а главное, из-за угловых колебаний

продольной оси ОЭСС и конечного времени экспозиции отметки от объекта наблюдения "размываются" и могут достигать размеров около 15–20 пикселей. В этих условиях используется простой и надежный алгоритм оконтуривания отметки произвольной площади и расчета координат энергетического центра пятна, принимаемого за координаты объекта наблюдения. Одними из особенностей, характеризующих условия функционирования алгоритма, являются произвольные формы и размеры пятна от излучающего объекта, произвольный характер распределения яркостей по пикселям этого пятна.

В процессе функционирования алгоритма на любом кадре производится последовательный анализ полезных сигналов  $u_{ij}^0$  ФЧЯ (пикселей) матрицы кадра. Просмотр ведется построчно. Ненулевой полезный сигнал очередной ФЧЯ с координатами  $i$  (номер строки) и  $j$  (номер столбца) свидетельствует о наличии пятна от очередного объекта наблюдения.

Внутрикадровая обработка измерений ОЭСС завершается построением списка отметок от объектов наблюдения, включающего номера, координаты и значения полезных сигналов всех отметок от объектов наблюдения, обнаруженных в текущем кадре изображения.

### Демонстрационные расчеты

На рис. 5 в качестве иллюстрации показаны результаты построения изображения двух объектов наблюдения на матрице ФПУ (интегральная ФЧЯ) ОЭСС КЛА для различных условий наблюдения. Первый объект наблюдения — круговой конус, излучающий, как абсолютно черное тело. Второй объект наблюдения — шар, излучающий, как абсолютно черное тело, и отстоящий от конуса на расстоянии  $L$ . Температура поверхностей первого и второго объектов постоянная по всей поверхности излучения и по времени. Оптико-спектральные характеристики ОЭСС КЛА соответствуют характеристикам типовых ОЭСС КЛА, которые используются для исследования космического пространства [4]. Конус и шар находятся в окрестности апогея эллиптической орбиты КЛА. Остальные неуказанные исходные данные, необходимые для модельных расчетов, приведены в таблице.

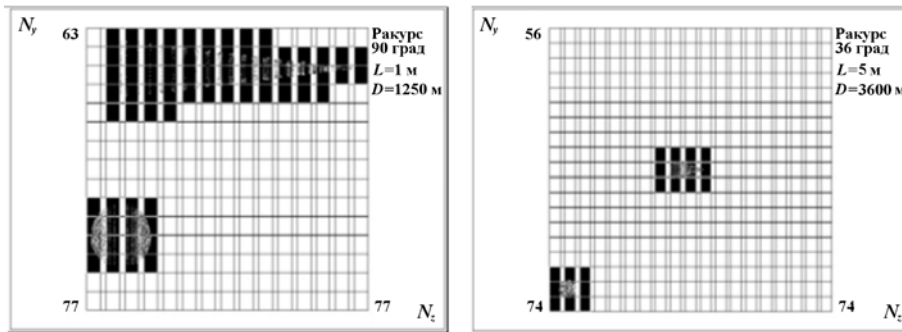


Рис. 5. Изображение конуса и шара на матрице ФПУ ОЭСС КЛА:  $L$  — расстояние между объектами наблюдения;  $D$  — дальность до объекта;  $N_y$  — количество ФЧЯ матрицы ФПУ по горизонтали;  $N_z$  — количество ФЧЯ матрицы ФПУ по вертикали

### Исходные данные

Величина	Единицы измерения	Значение
Температура поверхности объекта наблюдения	К	300
Высота конуса	м	2
Радиус конуса	м	0,4
Радиус шара	м	0,25
Высота апогея эллиптической орбиты КЛА	км	1 900

### Заключение

Модель ОЭСС КЛА, описанная в данной статье, запрограммирована и протестирована. Она использовалась в исследованиях различных динамических процессов КЛА, требующих наличия ОЭСС, а также возможностей селекции тела по его тепловому излучению, вызванному нагревом излучением других тел (Солнца, Земли) в системах защиты от космического мусора и предупреждения о метеоритной опасности.

### Список литературы

1. *Артамонов С. В., Прошкин В. А., Сенилов А. Э., Шанин И. И.* Методика расчета потока излучения, падающего на поверхность космического летательного аппарата // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2008. Вып. 2. С. 41–59.
2. *Мухачев Б. П., Артамонов С. В.* Методика определения некоторых параметров интегральной фоточувствительной ячейки фотоприемного устройства оптико-электронных средств // Там же. 2007. Вып. 2. С. 62–67.
3. *Осипов В. В., Пономаренко В. П., Селяков А. Ю.* Предельные характеристики новых смотрящих гибридных ИК-матриц на основе HgCdTe // Прикладная физика. 1999. №. 2. С. 5–25.
4. Космическая съемка Земли. М.: Радиотехника, 2003.

Статья поступила в редакцию 08.10.08.

---