

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 среды¹, 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].

¹Объекты 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

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

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

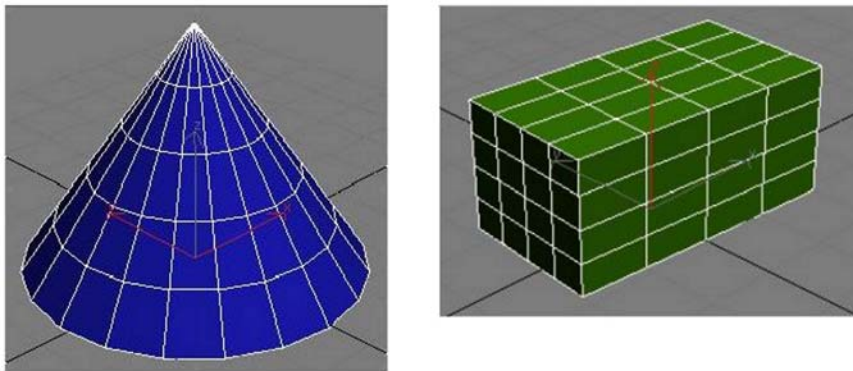


Рис. 2. Примеры facетной модели поверхности объекта наблюдения

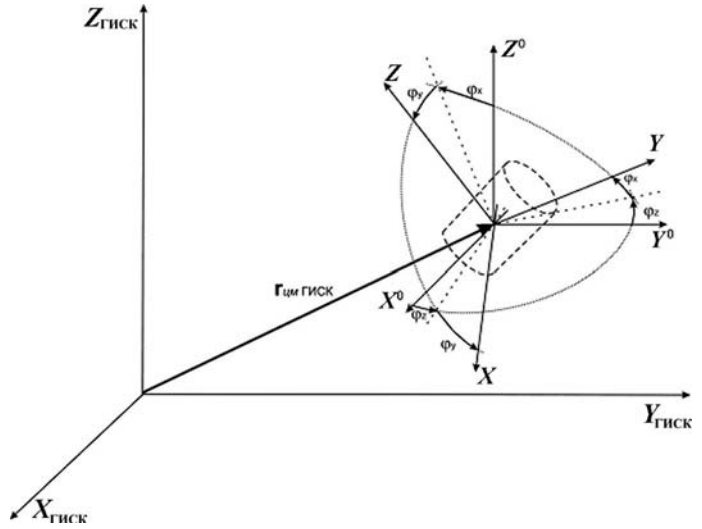


Рис. 1. Положение элемента объекта наблюдения в пространстве: $r_{\text{цмГИСК}}$ — радиус-вектор центра масс объекта в ГИСК для текущего момента времени t ; $X^0 Y^0 Z^0$ — начальная ориентация ССК объекта относительно ГИСК; $X Y Z$ — текущая ориентация ССК объекта относительно ГИСК; $\varphi_x, \varphi_y,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

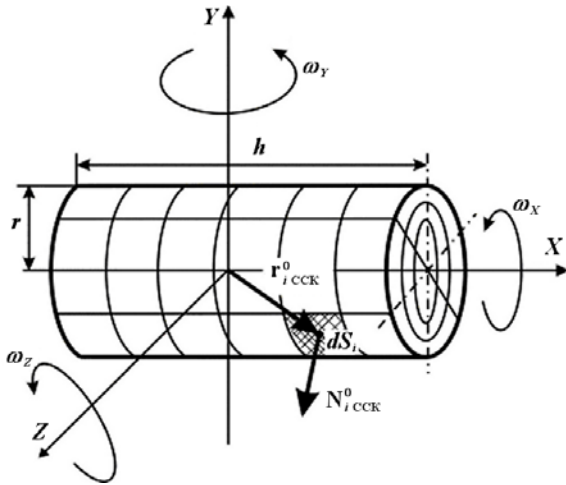


Рис. 3. ССК и фацетная модель объекта наблюдения: r — радиус основания кругового цилиндра; h — высота цилиндра; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — угловые скорости вращения вокруг соответствующих осей ССК; dS_i — площадь фацета

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 фацета поверхности объекта наблюдения по правилам геометрической оптики отображается на матрицу ФПУ. Модель оптической системы приемника — тонкая бесконечная линза с заданным диаметром D_d и фокусным расстоянием f . Потери энергии лучистого потока в оптической системе учитываются с помощью коэффициента потерь. Геометрические aberrации (сферическая aberrация, 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

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 фацета, функция от координат поверхности объекта наблюдения; $\varepsilon_{si}(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения поверхности i -го фацета.

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.

освещенности ФПУ. Освещенность каждой ячейки ФПУ рассчитывается с учетом *слепых зон*² 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 $\mathbf{r}_{i\,np}$ и компоненты векторов нормалей $\mathbf{N}_{i\,np}$ определяются в системе координат ФПУ из формул (рис. 4)

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{i\,np} &= C(\varphi_7; \varphi_8; \varphi_9) [C^T(\varphi_4; \varphi_5; \varphi_6) (\mathbf{r}_{цм\,ГИСК} - \mathbf{r}_{цм\,КЛА\,ГИСК} + C(\varphi_1; \varphi_2; \varphi_3) \mathbf{r}_{i\,ССК}^0) - \mathbf{r}_{фм}]; \\ \mathbf{N}_{i\,np} &= C(\varphi_7; \varphi_8; \varphi_9) C^T(\varphi_4; \varphi_5; \varphi_6) C(\varphi_1; \varphi_2; \varphi_3) \mathbf{N}_{i\,ССК}^0. \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{r}_{цм\,ГИСК}$, $\mathbf{r}_{цм\,КЛА\,ГИСК}$ — 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; $\mathbf{r}_{фм}$ — вектор, определяющий положение начала координат ССК ФПУ (точка пересечения оптической оси с фокальной

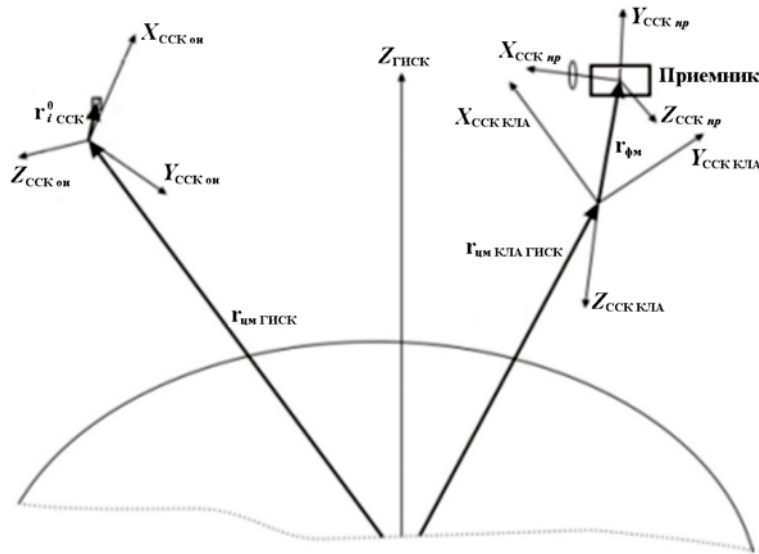


Рис. 4. К определению компонент векторов $\mathbf{r}_{i\,np}$ и $\mathbf{N}_{i\,np}$ ($X_{ССК\,он}$, $Y_{ССК\,он}$, $Z_{ССК\,он}$ — орты ССК объекта наблюдения)

²Зоны 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 σ) 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 α 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.

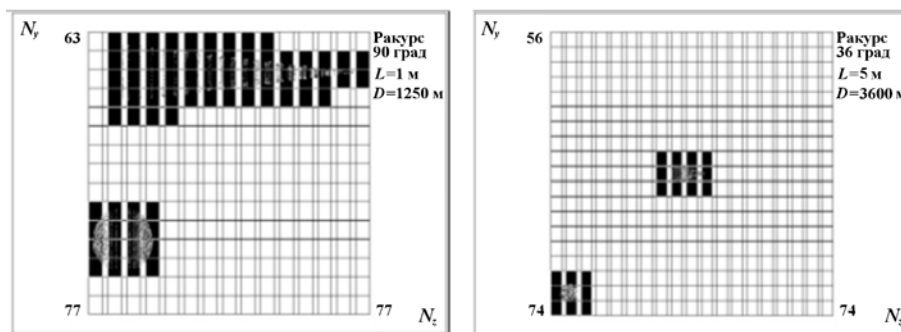


Рис. 5. Изображение конуса и шара на матрице ФПУ ОЭСС КЛА: L — расстояние между объектами наблюдения; D — дальность до объекта; N_y — количество ФЧЯ матрицы ФПУ по горизонтали; N_z — количество ФЧЯ матрицы ФПУ по вертикали

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., Семенов 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.
