

## СПОСОБ ОЦЕНИВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Р. О. Лавров<sup>1</sup>, И. В. Чашин<sup>2</sup>, А. Ю. Иваню<sup>3</sup>, А. В. Иваню<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,  
Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1, 2, 3, 4</sup>vka@mil.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Поднимается проблема снижения статистической погрешности при формировании параметров проецирования оптико-электронных изображений космических объектов с использованием трехмерной оптико-геометрической модели, поскольку применение существующих методов построения таких моделей ограничивается неопределенностью ракурса космического объекта и размеров его геометрических примитивов, что приводит к ошибкам совмещения, выходящим за пределы статистической погрешности. *Материалы и методы.* Для преодоления указанных ограничений при формировании параметров проецирования изображений предлагается вариант построения проективной конфигурации, основанный на использовании механизма восприятия глубины сцены при ее отображении на плоскость изображения. *Результаты.* Разработан алгоритм определения коэффициентов диффузного отражения, основанный на формальном представлении векторов оптических характеристик элементов конструкции космического объекта и приводящий к снижению неопределенности при разбиении поверхностей на классы эквивалентности по коэффициенту диффузного отражения. *Выводы.* Принципиальное отличие предлагаемого подхода заключается в качественно иной инструментальной поддержке определения коэффициентов диффузного отражения за счет анализа топологии элементов конструкции космического объекта.

**Ключевые слова:** моделирование космических объектов, статистическая погрешность, геометрические и оптические характеристики, обработка информации

**Для цитирования:** Лавров Р. О., Чашин И. В., Иваню А. Ю., Иваню А. В. Способ оценивания статистической погрешности оптико-геометрических данных для обработки и анализа информации космических средств // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 153–166. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-12

## THE METHOD OF STATISTICAL EVALUATION ERRORS IN OPTICAL AND GEOMETRIC DATA FOR INFORMATION PROCESSING AND ANALYSIS SPACE ASSETS

R.O. Lavrov<sup>1</sup>, I.V. Chashchin<sup>2</sup>, A.Yu. Ivanyu<sup>3</sup>, A.V. Ivanyu<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, Russia  
<sup>1, 2, 3, 4</sup>vka@mil.ru

**Abstract.** *Background.* The paper raises the problem of reducing the statistical error in the formation of projection parameters of optoelectronic images of space objects using a three-dimensional opto-geometric model, since the use of existing methods for constructing such models is limited by the uncertainty of the angle of the space object and the size of its geometric primitives, which leads to alignment errors beyond the statistical error. *Materials and methods.* To overcome these limitations in the formation of image projection parameters, a variant of constructing a projective configuration based on the use of a mechanism for perceiving the depth of a scene when it is displayed on the image plane is proposed. *Results.* An algorithm for determining diffuse reflection coefficients has been developed based on a formal representation of the optical characteristics vectors of the structural elements of a space object and leading to a reduction in uncertainty when dividing surfaces into equivalence classes according to the diffuse reflection coefficient. *Conclusions.* The fundamental difference between the proposed approach is a qualitatively different instrumental support for determining diffuse reflection coefficients by analyzing the topology of the structural elements of a space object.

**Keywords:** modeling of space objects, statistical error, geometric and optical characteristics, information processing

**For citation:** Lavrov R.O., Chashchin I.V., Ivanyu A.Yu., Ivanyu A.V. The method of statistical evaluation errors in optical and geometric data for information processing and analysis space assets. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):153–166. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-12

### **Введение**

В околоземном космическом пространстве находится множество космических объектов (КО). Космические объекты техногенного происхождения, являющиеся космическими средствами (КСр), после окончания срока активного существования переходят в разряд космического мусора, требующего непрерывного контроля [1]. Для проведения мониторинга КО оптико-электронными КСр необходимо наличие оптических характеристик, позволяющих осуществлять достоверное обнаружение и сопровождение объектов наблюдения. Для ряда КО имеются исходные видовые данные, представляющие собой цифровые фотографические изображения. Эти изображения предъявляются разработчиками КСр на этапах монтажных и испытательных работ, проводимых среди прочего в условиях открытого космоса. Для получения оптических характеристик может быть использована трехмерная оптико-геометрическая модель (ОГМ) КО.

### **Материалы и методы**

В общем случае задача построения ОГМ КСр относится к классу обратных некорректных задач, характеризующихся как наличием статистических погрешностей оценок параметров, так и достаточно значимой неопределенностью исходных данных. В связи с этим в работе [2] в качестве решения данной задачи использованы методы обратной пространственной засечки и построения одиночных объектных моделей методами последовательных приближений. С целью снижения неопределенности исходных данных, прежде всего параметров проецирования, в работе [2] сформулированы методы, основанные на использовании маркерных точек для совмещения объекта съемки и геометрической модели КО.

Однако применение этих методов ограничивается неопределенностью ракурса модели КО и размером его геометрических примитивов, что приводит к ошибкам совмещения, выходящим за пределы статистической погрешности. Для преодоления указанных ограничений в работе предлагается алгоритм, основанный на механизме восприятия глубины сцены при ее отображении на плоскость изображения.

Рассмотрим основные свойства изображения, получаемого при центральном проецировании объекта наблюдения на картинную плоскость. Проецирование трехмерного объекта осуществляется с помощью прямых проецирующих лучей, называемых проекторами [3]. Они выходят из центра проекции, проходят через каждую точку объекта и, пересекая картинную плоскость, образуют проекцию. Так как проекция отрезка сама является отрезком, то достаточно спроектировать лишь конечные точки рассматриваемого объекта.

При фотографировании объекта картинная плоскость перпендикулярна оптической оси объектива. Введем систему декартовых координат в объектном пространстве, связанную с картинной плоскостью следующим образом. Ось абсцисс  $OX$  расположена по горизонтали (в плоскости местного горизонта), ось ординат  $OY$  расположена по вертикали картинной плоскости. Ось аппликат  $OZ$  совпадает с оптической осью объектива, направлена в сторону наблюдателя и вместе с осями  $OX$  и  $OY$  образует правую систему координат (СК). Центр СК  $OXYZ$  расположен в точке пересечения оси  $OZ$  и ортогональной плоскости  $OXY$ , проходящей через некоторую опорную точку (ОТ) объекта наблюдения. Обозначим аппликату центра проекции как  $z_{\text{ц}}$  ( $z_{\text{ц}} > 0$ ), а координаты опорной точки в плоскости  $OXY$  как  $(x_o, y_o)$ . Тогда для любой точки  $(x, y, z)$ , принадлежащей проектору, который пересекает плоскость  $OXY$  в точке  $(x_o, y_o)$ , и имеющей  $z < z_{\text{ц}}$ , смещения проецированных координат  $d_x$  и  $d_y$  [2] определяются как

$$d_x = x_o - x = k_n \cdot x, \quad d_y = y_o - y = k_n \cdot y, \quad k_n = \frac{z}{z_{\text{ц}} - z}. \quad (1)$$

С учетом того, что координаты  $(x, y)$  являются результатом параллельного проецирования произвольной точки проектора на плоскость  $OXY$ , то выражение (1) позволяет осуществлять переход от параллельной проекции трехмерного объекта к центральной проекции в определенной выше системе координат  $OXYZ$ . Обозначим координаты точки в картинной плоскости как  $(x_k, y_k)$ . Исходя из равного масштаба по координатным осям картинной плоскости, соотношения между координатами  $(x, y)$  и  $(x_k, y_k)$  определяются следующим образом:

$$x_k = \frac{x}{k_m}, \quad y_k = \frac{y}{k_m}, \quad k_m = \frac{|x_2 - x_1|}{|x_{k2} - x_{k1}|} = \frac{|y_2 - y_1|}{|y_{k2} - y_{k1}|}, \quad (2)$$

где  $k_m$  – масштабный коэффициент;  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  – координаты концевых точек отрезка в объектном пространстве;  $(x_{k1}, y_{k1})$  и  $(x_{k2}, y_{k2})$  – координаты точек проекции отрезка в картинной плоскости.

Для построения ОГМ КО используются геометрические примитивы [2], которые позволяют построить в терминах функционально-конструктивных элементов геометрическое описание КО в целом. Назовем объединенный элемент трехмерного представления конструкцией КО. Для отображения трехмерной геометрии на картинную плоскость конструкция КО определяется группой параметров  $\{x_o, y_o, z_{\text{ц}}, k_m, \alpha, \beta, \gamma\}$ , где  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$  – углы разворота строительной СК конструкции КО относительно опорной точки, положение которой в СК OXYZ задается вектором положения  $\bar{P} = \{x_o, y_o, z_o\}$ .

Обозначим:  $\bar{T} = \{x_1, y_1, z_1\}$  – вектор координат концевой точки отрезка в объектном пространстве после сдвига по отношению к центру примитива и поворота относительно опорной точки. Тогда суммарный вектор, который задает координаты точки примитива в СК OXYZ, связанной с центром проекции в объектном пространстве, определяется как

$$\bar{\Sigma} = \bar{P} + \bar{T} = \{\Sigma_x, \Sigma_y, \Sigma_z\}. \quad (3)$$

С учетом выражения (1) смещение проективных координат относительно суммарного вектора  $\bar{\Sigma}$  определяется следующим образом:

$$k_n = \frac{\Sigma_z}{z_{\text{ц}} - \Sigma_z}, d_x = \Sigma_x \cdot k_n, d_y = \Sigma_y \cdot k_n. \quad (4)$$

Использование выражений (1)–(4) позволяет вычислить смещения  $\Delta x_k$  и  $\Delta y_k$  координат концевой точки относительно опорной точки на дискретной сетчатке изображения в виде

$$\Delta x_k = \text{Round}\left(\frac{x_1 + d_x}{k_m}\right), \Delta y_k = \text{Round}\left(\frac{y_1 + d_y}{k_m}\right), \quad (5)$$

где  $\text{Round}(v)$  – функция округления вещественной переменной  $v$  до ближайшего целого.

В выражении (5) результаты вычисления названы смещениями вследствие того, что в системе координат монитора параметр  $\Delta y_k$  необходимо брать с отрицательным знаком. Первоначально выражение (5) может применяться без учета параметров проецирования. В этом случае  $d_x = 0$ ,  $d_y = 0$  и имеет место параллельное проецирование. После включения в процесс отображения параметров проецирования и достижения малых отклонений с целью снижения неопределенности исходных данных могут применяться методы, основанные на использовании маркерных точек для совмещения объекта съемки и геометрической модели КО [3]. Однако применение указанных методов недостаточно наглядно отображает результат совмещения с точки зрения учета особенностей центрального проецирования.

При решении прямой задачи по построению центральной проекции для отображения перспективы используют понятие точки схода. Под точкой схода понимается пересечение проекций двух параллельных прямых, лежащих в плоскости, которая не параллельна плоскости проекции [3]. В этом случае используется свойство центрального проецирования: параллельные прямые

в общем случае в изображении не параллельны. На практике для построения точек схода используются концевые точки двух противоположных сторон прямоугольника.

При анализе изображений КО применение точек схода имеет ряд ограничений [4]. Поскольку количество прямоугольных граней КО ограничено видимыми поверхностями, то при геометрическом построении точка схода может выйти за пределы изображения. Процедура построения точки пересечения проекций двух прямых в условиях неопределенности представляется достаточно сложной, поэтому для компактного отображения механизма восприятия глубины воспользуемся свойствами проектора, который является прямым проецирующим лучом, выходящим из центра проекции, проходящим через каждую точку объекта и пересекающим картинную плоскость в точке проекции.

### *Результаты и обсуждение*

Построим в объектном пространстве две пирамиды. Первую пирамиду – с вершиной в центре проекции на оси  $OZ$  и с основанием в виде прямоугольного примитива. Вторую пирамиду – с той же вершиной и основанием в виде проекции прямоугольного примитива на плоскость  $OXY$ . В этом случае боковые ребра пирамид будут пересекаться, так как они образованы совпадающими проекторами. Если спроецировать пирамиды на картинную плоскость, то получим два четырехугольника, концевые точки которых соединены с общей точкой пересечения оси  $OZ$  и плоскости изображения. В соответствии со свойствами центрального проецирования отрезки, соединяющие общую точку пересечения с концевыми точками двух четырехугольников, будут лежать на совпадающих лучах. Полное совпадение двух фигур будет в том случае, если прямоугольный примитив лежит в плоскости  $OXY$ . Чем дальше расположен исходный примитив от плоскости  $OXY$ , тем больше отличие его от проекции и сильнее восприятие глубины наблюдаемого объекта.

Проиллюстрируем высказанные утверждения на примере схематичного изображения космического телескопа (рис. 1). На рис. 1 представлены проекции пирамид, построенные в соответствии с предложенным алгоритмом. Геометрические примитивы в виде прямоугольников лежат в плоскости поверхности солнечных батарей. Солнечные батареи располагаются в объектном пространстве по разные стороны относительно выбранной плоскости проекции, поэтому четырехугольник центрального проецирования для ближней к наблюдателю солнечной батареи является внешним по отношению к четырехугольнику, полученному посредством параллельного проецирования. Для дальней солнечной батареи имеет место обратное расположение.

Показанная на рис. 1 конфигурация из двух проективных пирамид позволила уточнить координаты опорной точки относительно центра проекции на картинной плоскости. Параметры проецирования, определенные по двум маркерным точкам [5], имели следующие значения:  $x_o = 4,6$  м,  $y_o = -3,5$  м,  $z_u = 227,5$  м. В результате использования описанного выше алгоритма была уточнена координата по оси абсцисс, получившая значение  $x_o = 5,1$  м. Соответствующая полученным параметрам конфигурация представлена на рис. 1. Необходимо отметить, что предложенный алгоритм позволяет устранять не только неопределенность параметров проецирования, но и неопределенность ракурса модели КО и размеров его геометрических примитивов, не являющихся опорными.

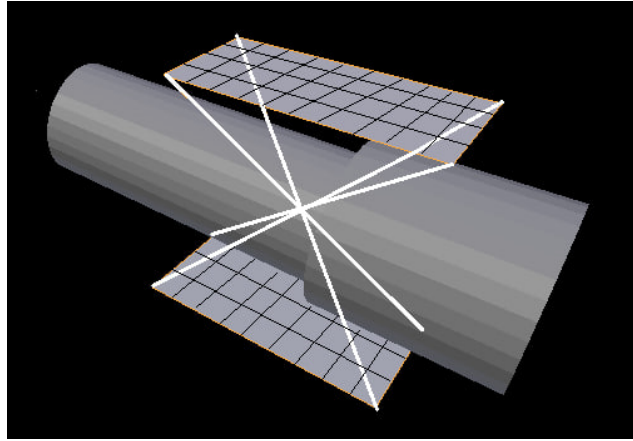


Рис. 1. Схематичное изображение космического телескопа

Следующим шагом при решении задач определения характеристик ОГМ наблюдаемых КО является определение их отражательных характеристик. В общем случае отраженное от поверхности излучение можно представить в виде двух независимых компонент: диффузной и зеркальной [6]. Как правило, при наблюдении КО имеются интервалы времени, в пределах которых на вход оптической системы попадает только диффузно отраженное от КО излучение. Разработанный в исследовании [2] подход позволяет представить КО в виде набора из  $N$  геометрических примитивов, имеющих некоторые коэффициенты диффузного отражения, а уравнение для расчета силы отраженного излучения имеет вид

$$I(t) = D_1(t) \cdot \rho_{d1} + D_2(t) \cdot \rho_{d2} + \dots + D_N(t) \cdot \rho_{dN}, \quad (6)$$

где  $\rho_{di}$  – коэффициент отражения  $i$ -го элемента конструкции;  $D_i(t)$  – результат расчета диффузного отражения;  $E_{\Delta\lambda}$  – поток солнечного излучения в диапазоне  $\Delta\lambda$ .

В векторно-матричной форме выражение (6) будет иметь вид

$$I_{u<M>} = D_{[MN]} Rd_{<N>} + \Delta_{<M>}, \quad (7)$$

где  $I_{u<M>}$  – вектор-столбец из  $M$  отсчетов силы излучения;  $Rd_{<N>}$  – вектор из  $N$  уточняемых коэффициентов диффузного отражения;  $D_{[MN]}$  – матрица результатов расчета операторов  $D_{mn} = D_n(t_m)$  – матрица наблюдения КО;  $\Delta_{<M>}$  – вектор-столбец невязок по  $M$  измерениям силы излучения.

В соответствии с принципом Гаусса – Лежандра [7] оценка вектора отыскивается при минимизации суммы квадратов невязок:

$$f(Rd_{<N>}) = \sum_{i=1}^M \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^M [I_{ui} - D_{i[N]} Rd_{<N>}]^2. \quad (8)$$

В соответствии с работой [2] оценка  $Rd_{<N>}^*$  вычисляется по формуле

$$Rd_{<N>}^* = (D_{[MN]}^T \cdot D_{[MN]})^{-1} D_{[MN]}^T \cdot I_{u<M>}. \quad (9)$$

Основным условием определения коэффициентов диффузного отражения является неособенность матрицы  $D_{[MN]}^T D_{[MN]}$  ( $\det D_{[MN]}^T D_{[MN]} \neq 0$ ), оно реализуется при отсутствии линейности между столбцами и строками матрицы наблюдения. Физически это достигается за счет различия в геометрической форме элементов конструкции КО или за счет их различной взаимной пространственной ориентации в строительной системе координат. Это ограничение связано с возникновением подобных по форме фазовых зависимостей, под которыми понимают зависимость величины излучения КО от фазового угла [8, 9].

На рис. 2,а приведены фазовые зависимости силы отраженного излучения от плоской площадки, диффузной и зеркальной сфер, а на рис. 2,б – для матовых (диффузных) цилиндров, у которых оси вращения развернуты на 90 и 45 градусов соответственно.

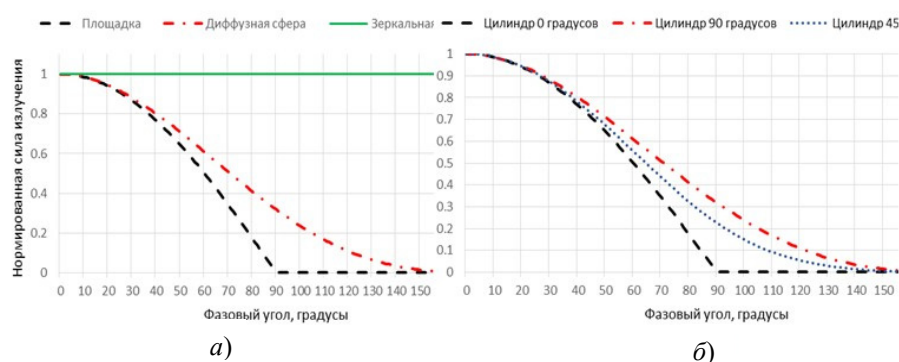


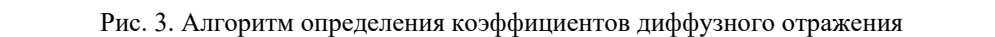
Рис. 2. Пример фазовых зависимостей

Анализ этих зависимостей показывает, что цилиндрические поверхности могут иметь фазовую зависимость излучения как у плоской площадки или как у диффузной сферы. В таком случае мы имеем одинаковые фазовые зависимости отраженного излучения от этих элементов. Решение системы уравнений, в которой из-за одинаковых фазовых зависимостей элементы системы линейны по отношению друг к другу, невозможно.

Для преодоления данного ограничения необходимо провести анализ ОГМ КО и выявить элементы, имеющие одинаковые фазовые зависимости [10]. Например, солнечные батареи можно объединить в один геометрический элемент, так как они однозначно имеют одинаковый материал покрытия и форму с ориентацией. Можно также объединять и другие элементы конструкции, различные по форме, но имеющие одинаковый материал покрытия.

Объединение различных по материалу покрытия элементов конструкции также возможно, однако в этом случае оценки оптических характеристик для такого элемента будут иметь промежуточные значения между фактическими характеристиками каждого элемента, входящего в составной элемент [11]. По результатам анализа принимается решение о группировке тех или иных геометрических элементов (конструкции) КО в один, тем самым осуществляя снижение неопределенности при разбиении поверхностей на классы эквивалентности по коэффициенту диффузного отражения или по фазовым характеристикам.

Ниже предлагается алгоритм определения коэффициентов диффузного отражения (рис. 3), в котором усовершенствован подход, изложенный в работе [2], за счет анализа топологии элементов конструкции КО.



160



детерминанта используется критерий проверки линейности фазовых характеристик элементов конструкции КО для текущего сеанса фотометрических наблюдений посредством определения одинаковых элементов конструкции и/или линейности векторов  $\vec{D}_p$  ( $p = 1 \dots N$ ).

Если детерминант не равен нулю, то выполняется дополнительная проверка, позволяющая избежать плохой обусловленности матрицы, приводящая к ошибкам в определении коэффициентов отражения, которые могут получиться отрицательными или быть больше единицы. На возможность определения параметров влияет множество факторов, таких как турбулентность атмосферы, степень изменения ракурсов подсветки и наблюдения, а также сложность и количество элементов ОГМ КСр. Для проверки обусловленности матрицы  $D_{[MN]}^T D_{[MN]}$  необходимо ввести критерий, при котором величина детерминанта приведенной матрицы не должна быть меньше порогового значения  $\varepsilon$ . Однако величина  $\varepsilon$  варьируется в зависимости от сеанса наблюдений, а также от характеристик ОГМ КО. В настоящее время способа для определения надежного критерия  $\varepsilon$  авторами не выработано, что является предметом дальнейших исследований. Для общности такая проверка в алгоритме предусмотрена в блоке 8.

На рис. 4 представлены смоделированные траектории движения подспутниковой точки КО и положение Солнца. На увеличенной части отображена траектория движения подспутниковой точки КО непосредственно в ходе сеанса наблюдения. Условия орбитального движения КО выбраны таким образом, что на момент сеанса наблюдения точка наблюдения (координаты 22032'06" ю.ш., 45034'58" з.д.) находится на неосвещенной стороне Земли [12], Солнце зашло более чем на 10 град ниже линии местного горизонта, а КО находится над неосвещенной частью Земли.

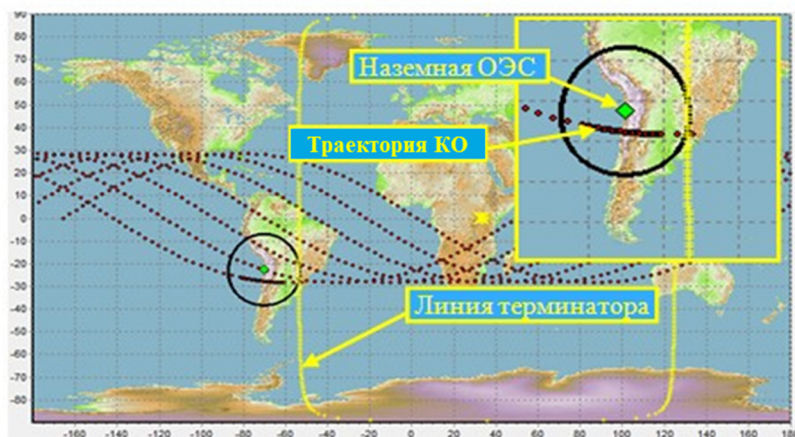


Рис. 4. Траектории движения подспутниковой точки КО

Для работы алгоритма необходимо выполнение условия, когда в поле зрения оптической системы не попадает зеркально отраженное излучение от элементов конструкции наблюдаемого КО. На рис. 5,а представлены результаты моделирования полной силы излучения КО, а также отдельно приведены результаты моделирования зеркально отраженного и диффузно отраженного излучения от КО в целом.

Анализ результатов моделирования показывает, что начиная с 20-й секунды в поле зрения оптической системы не попадает зеркально отраженное излучение от наблюдаемого КО. Таким образом, для дальнейшего формирования матрицы наблюдения и уравнения наблюдения будет использован промежуток времени после 20-й секунды. На рис. 5,б представлена матрица наблюдения для разных частей конструкции КО. Кривая результата наблюдения – это и есть полная сила излучения от КО.

Анализ элементов матрицы наблюдения свидетельствует о совпадении векторов для обеих солнечных батарей и необходимости их объединения в один общий вектор. Анализ векторов корпуса и телескопа показывает их линейную зависимость, а учитывая, что оба этих элемента имеют общий материал покрытия, то в соответствии с предлагаемым алгоритмом эти два вектора необходимо сложить и получить объединенный элемент конструкции.

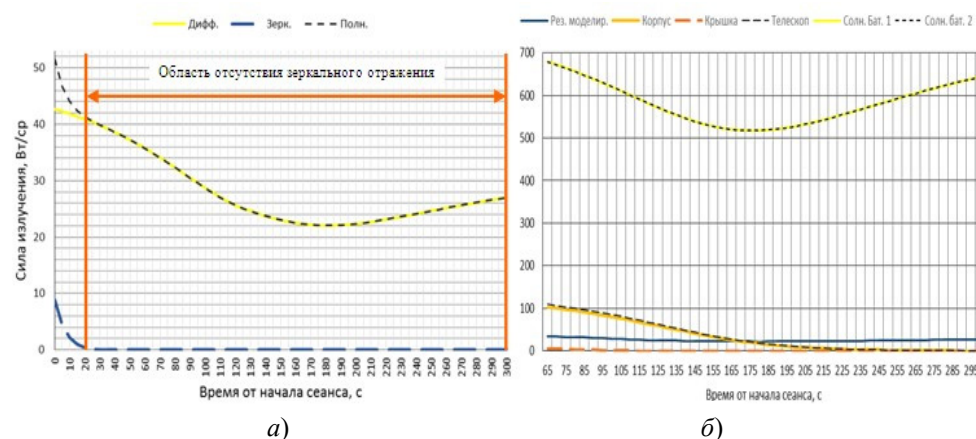


Рис. 5. Реализация силы излучения КО и его матрица наблюдения

На рис. 6 представлены результаты моделирования силы излучения с учетом различных уровней шума атмосферы. С учетом полученных результатов моделирования и в соответствии с алгоритмом были сформированы уравнения наблюдения и получены оценки коэффициентов диффузного отражения.

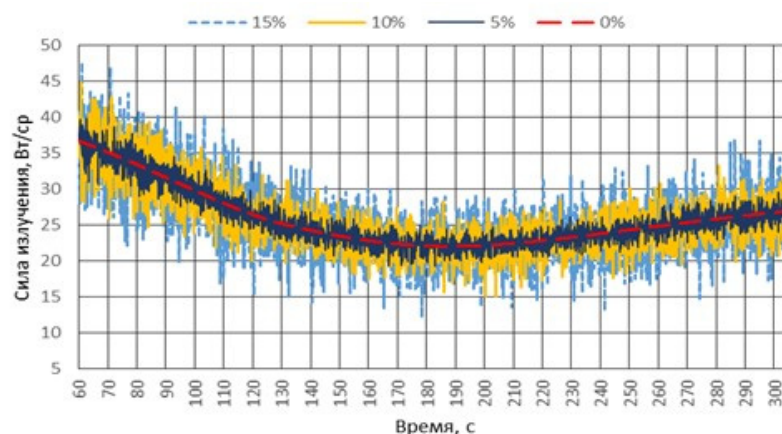


Рис. 6. Зависимость силы излучения КО от различных уровней шума атмосферы

В табл. 1 представлен результат определения коэффициентов диффузного отражения элементов конструкции КО с ошибками определения этих коэффициентов в зависимости от качества измерений.

Таблица 1

Результат определения коэффициентов диффузного отражения  
элементов конструкции

Ошибка измерения	0 %		5 %		10 %		15 %	
Элемент (исх. коэф.)	результат	ошибка	результат	ошибка	результат	ошибка	результат	ошибка
корпус (0,009)	0,009	0,004	0,009	2,058	0,009	3,693	0,012	38,333
крышка (0,771)	0,771	0,087	0,766	0,483	0,750	2,658	0,686	10,867
батареи (0,021)	0,021	0,001	0,021	0,349	0,021	0,574	0,021	1,167

Анализ результатов показывает, что ошибки определения диффузных коэффициентов отражения незначительны для измерений, имеющих среднеквадратическую ошибку не более 10 %.

Таким образом, с учетом полученных результатов можно сделать вывод, что вариант построения проективной конфигурации, основанный на использовании механизма восприятия глубины сцены при ее отображении на плоскость изображения, и усовершенствованный алгоритм определения коэффициентов диффузного отражения элементов конструкции наблюдаемого КО позволяют избежать ошибок при формировании параметров проецирования оптико-электронных изображений КСр, обусловленных зашумленностью атмосферы.

### Заключение

Применение способа, основанного на геометрическом описании конструкции КО (совокупности примитивов) и предложенном в работе алгоритме определения коэффициентов диффузного отражения элементов конструкции наблюдаемого объекта, позволяет снизить статистическую погрешность при формировании исходных данных оптико-геометрического моделирования космических объектов в ходе обработки и анализа информации КСр. Предлагаемый в работе вариант построения проективной конфигурации наблюдаемого объекта и алгоритм расчета оценки коэффициентов диффузного отражения также могут быть применимы в различных отраслях промышленности, где требуется повышение точности распознавания наблюдаемого объекта на оптических снимках в зависимости от всевозможных помех среды, в которой осуществляется съемка.

### Список литературы

1. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. М. : ИКИ РАН, 2013. 216 с. (Серия «Механика, управление и информатика»).
2. Ахметьянов В. Р., Лутов И. О., Олейников М. И. Методы снижения неопределенности исходных данных оптико-геометрического моделирования космических объектов // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 10. С. 19–27.

3. Сиденко Л. А. Компьютерная графика и геометрическое моделирование : учеб. пособие. СПб. : Питер, 2009. 224 с.
4. Chatterjee S., Simonoff S. J. Handbook of regression analysis. John Wiley & Sons, 2013. 218 p.
5. Космический телескоп «Хаббл» // Международный научный сервер. URL: <http://Scientific.ru> (дата обращения: 15.05.2025).
6. Lu X.-P., Jewitt D. Dependence of light curves on phase angle and asteroid shape // Astronomical Journal. 2019. Dec. P. 1–2.
7. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов : пер. с англ. М. : Наука, 1979. 368 с.
8. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. 2-е изд. М. : Высш. шк., 1984. 219 с.
9. Фу К. Структурные методы распознавания образов : пер. с англ. М. : Мир, 1977. 318 с.
10. Калинина Н. Д., Куров А. В. Анализ методов распознавания и поиска образов на космических снимках // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. № 1. С. 174–188.
11. Golub G. H., Van Loan C. F. Matrix Computations. Fourth edition. Johns Hopkins University Press, 2013. P. 89–90.
12. Gallozzi S., Paris D., Scardia M., Dubois D. Concerns about ground-based astronomical observations: quantifying satellites constellations damages [astro-ph.IM]. 2020. P. 2.

### References

1. Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora = Space debris modeling*. Moscow: IKI RAN, 2013:216. (In Russ)
2. Akhmetyanov V.R., Lutov I.O., Oleinikov M.I. Methods of reducing the uncertainty of the initial data of optical and geometric modeling of space objects. *Aviakosmicheskoe priborostroenie = Aerospace instrumentation*. 2017;(10):19–27. (In Russ)
3. Sidenko L.A. *Komp'yuternaya grafika i geometricheskoe modelirovanie: ucheb. posobie = Computer graphics and geometric modeling: textbook. stipend*. Saint Petersburg: Piter, 2009:224. (In Russ)
4. Chatterjee S., Simonoff S.J. *Handbook of regression analysis*. John Wiley & Sons, 2013:218.
5. The Hubble Space Telescope. *Mezhdunarodnyj nauchnyj server = International Science Server*. (In Russ). Available at: <http://Scientific.ru> (accessed 15.05.2025).
6. Lu X.-P., Jewitt D. Dependence of light curves on phase angle and asteroid shape. *Astronomical Journal*. 2019:1–2.
7. Fukunaga K. *Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu raspoznavaniya obrazov: per. s angl = Introduction to the statistical theory of pattern recognition: transl. from English*. Moscow: Nauka, 1979:368. (In Russ)
8. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya. 2-e izd = Recognition methods. 2nd ed*. Moscow: Vyssh. shk. 1984:219. (In Russ)
9. Fu K. *Strukturnye metody raspoznavaniya obrazov: per. s angl. = Structural methods of pattern recognition: trans. from English*. Moscow: Mir, 1977:318. (In Russ)
10. Kalinina N.D., Kurov A.V. Analysis of image recognition and search methods in satellite images. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Priborostroenie» = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. "Instrumentation"*. 2012;(1): 174–188. (In Russ)

11. Golub G.H., Van Loan C.F. *Matrix Computations. Fourth edition.* Johns Hopkins University Press, 2013:89–90.
12. Gallozzi S., Paris D., Scardia M., Dubois D. *Concerns about ground-based astronomical observations: quantifying satellites constellations damages [astro-ph.IM]*. 2020:2.

### ***Информация об авторах / Information about the authors***

#### **Роман Олегович Лавров**

кандидат технических наук, доцент,  
заместитель начальника кафедры  
метрологического обеспечения  
вооружения, военной  
и специальной техники,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

#### **Roman O. Lavrov**

Candidate of technical sciences,  
associate professor, deputy head  
of the sub-department of metrological  
support of armaments, military and  
special equipment,  
Mozhaisky Military Aerospace  
Academy  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg,  
Russia)

#### **Игорь Вячеславович Чашин**

кандидат технических наук,  
преподаватель кафедры  
метрологического обеспечения  
вооружения, военной  
и специальной техники,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

#### **Igor V. Chashin**

Candidate of technical sciences,  
lecturer of the sub-department  
of metrological support of armaments,  
military and special equipment,  
Mozhaisky Military Aerospace  
Academy  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg,  
Russia)

#### **Анна Юрьевна Иваню**

кандидат технических наук,  
начальник учебной лаборатории  
кафедры метрологического  
обеспечения вооружения, военной  
и специальной техники,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

#### **Anna Yu. Ivanyu**

Candidate of technical sciences,  
head of the educational laboratory  
of the sub-department of metrological  
support of armaments, military and  
special equipment,  
Mozhaisky Military Aerospace Academy  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg,  
Russia)

#### **Антон Валерьевич Иваню**

начальник курса,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

#### **Anton V. Ivanyu**

Head of the course,  
Mozhaisky Military Aerospace  
Academy  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg,  
Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 26.02.2025**

**Поступила после рецензирования/Revised 13.04.2025**

**Принята к публикации/Accepted 18.07.2025**