

# КОСМИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

---

УДК 629.7.05; 681.518.3

*В.Ф. Губарев, В.П. Боюн, С.В. Мельничук, Н.Н. Сальников,  
В.А. Симаков, Л.А. Годунок, В.И. Комисаренко,  
В.Ю. Добровольский, С.В. Деркач, С.А. Матвиенко*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

### Введение

Активизация космической деятельности на орбите Земли и освоение дальнего космоса сформировали новые перспективные направления использования космической техники как для орбитального сервисного обслуживания (ОСО) функционирующих спутников, так и для борьбы с космическим мусором.

Создание аппаратных средств, позволяющих решить эти задачи, находится в сфере научных и практических интересов ведущих космических держав. Разрабатываются проекты по оказанию следующих услуг:

- подъем действующих космических аппаратов (КА) на рабочую орбиту при снижении орбиты КА в процессе эксплуатации;
- корректировка положения действующего КА на орбите, у которого полностью использован бортовой запас топлива;
- обслуживание действующих КА на орбите;
- очистка орбиты от нефункционирующих КА, в том числе и космического мусора.

Особую актуальность и коммерческую заинтересованность приобретает «очистка» геостационарной орбиты (ГСО), учитывая дефицитность и дороговизну точек, где могут быть расположены новые телекоммуникационные КА.

Компания *ViviSat* (США) разрабатывает аппарат *MEV*, который, пристыковавшись к клиентскому спутнику, снабжает его дополнительной энергетической установкой и необходимыми устройствами управления, продлевая срок жизни еще на 15 лет с возможностью последующей диагностики и обслуживания. Система стыковки *MEV* совместима с 80 % действующих спутников.

В миссии *E. DeOrbit* Европейского космического агентства планируется создание аппарата, обеспечивающего поиск дрейфующего объекта, сближение с ним, захват с помощью сети, гарпуна, руки-манипулятора или щупальцев с последующим входом и сгоранием в атмосфере Земли или переводом на более высокие орбиты.

Великобритания предлагает проект *CubeSail*, где используют тягу солнечного паруса для вывода космического мусора на более низкие орбиты.

© В.Ф. ГУБАРЕВ, В.П. БОЮН, С.В. МЕЛЬНИЧУК, Н.Н. САЛЬНИКОВ, В.А. СИМАКОВ, Л.А. ГОДУНОК, В.И. КОМИСАРЕНКО, В.Ю. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, С.В. ДЕРКАЧ, С.А. МАТВИЕНКО, 2016

*Международный научно-технический журнал  
«Проблемы управления и информатики», 2016, № 6*

Во всех случаях решение задач орбитального сервисного обслуживания связано с необходимостью выполнения сервисным межорбитальным КА (МКА) таких операций в космосе, как сближение с некооперируемыми клиентскими аппаратами (или космическим мусором), их захват/стыковка с последующей межорбитальной транспортировкой. Некооперируемые КА (НКА) не оснащены специальными стыковочными узлами, а также другими пассивными элементами (лазерными маяками, уголковыми отражателями и т.д.), применяемыми в системах стыковки.

Сотрудниками ЧАО «НПК «Курс» была предложена концепция стыковки МКА с НКА в рамках проекта «Азимут». Для ее реализации МКА должен быть оснащен бортовой радиолокационной станцией (РЛС) с активной фазированной решеткой, лазерным дальномером и блоком технического зрения. Предполагается, что с использованием РЛС система управления МКА должна обеспечить сближение с НКА до 20 метров. Дальнейшее сближение до расстояния 2 м и менее (необходимого для работы манипулятора) и синхронизация движения МКА и НКА осуществляются с использованием блока технического зрения и дальномера. Для выполнения этих маневров необходимо иметь измерения взаимных ориентации и положения НКА и МКА.

В данной работе рассматриваются математическая постановка задачи оценивания параметров взаимной ориентации и положения НКА и МКА с использованием видеокамеры и лазерного дальномера, установленных на МКА, а также возможные подходы к их решению. Изложен метод определения взаимного положения и ориентации на основе сравнения фактического изображения, полученного видеокамерой, с изображениями НКА, для которых известны параметры взаимного положения и ориентации. Предложено и рассмотрено три подхода к сравнению изображений. Приведены результаты имитационного моделирования работы метода по определению параметров взаимного положения и ориентации для всех трех подходов сравнения изображений.

### 1. Постановка задачи

Предполагается, что движение вокруг центра масс как МКА, так и НКА можно рассматривать как движение абсолютно твердых тел (упругость конструкций не учитывается, наличие емкостей, содержащих жидкости, не предполагается). Все параметры движения МКА известны, для НКА известны параметры орбитального движения, параметры движения вокруг центра масс неизвестны.

Для НКА задана его графическая трехмерная модель. Для большинства современных КА такая модель известна, так как в настоящее время она является обязательной частью технической документации КА.

Предполагается, что узлы лазерного дальномера и видеокамера жестко закреплены на поверхности МКА, направления оси лазерного источника и оптической оси видеокамеры также жестко фиксированы и известны. Видеокамера не имеет устройства изменения фокусного расстояния, т.е. не имеет подвижных деталей для повышения надежности ее работы в условиях космоса. Оптические характеристики видеокамеры известны.

Будем считать, что с МКА и НКА связаны системы прямоугольных координат  $O_1x_1y_1z_1$  и  $O_2x_2y_2z_2$  соответственно. Предполагается, что оси этих систем координат выбраны таким образом, что на этапе стыковки система управления МКА в идеальном случае должна обеспечить совпадение осей  $O_1x_1$  и  $O_2x_2$  и параллельность осей  $O_1y_1$  и  $O_2y_2$ , а также  $O_1z_1$  и  $O_2z_2$ . Единичные орты, соответствующие координатным линиям для системы  $O_1x_1y_1z_1$ , будем обозначать  $e_1^i$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , а для системы  $O_2x_2y_2z_2$  —  $e_2^i, i = \overline{1, 3}$ . Задать взаимные положение и ори-

ентацию МКА и НКА означает в системе координат, например  $O_1x_1y_1z_1$ , задать координаты вектора  $r_{12} = O_2 - O_1$  и матрицу координат векторов  $e_2^i, i = \overline{1, 3}$ , в базе  $e_1^i, i = \overline{1, 3}$ , т.е. матрицу  $T_{12} = (t_{12ij}) = ((e_2^i, e_1^j))$ , где  $(e_2^i, e_1^j)$  — скалярное произведение векторов  $e_2^i$  и  $e_1^j$  в евклидовой метрике пространства  $R^3$ . Очевидно, что если известна взаимная ориентация и положение в системе координат МКА, то известна ориентация МКА относительно системы координат  $O_2x_2y_2z_2$ , связанной с НКА, т.е., зная координаты вектора  $r_{12}$  и матрицу  $T_{12}$ , можно вычислить аналогичные величины, координаты вектора  $r_{21} = O_1 - O_2$  и матрицу  $T_{21} = (t_{21ij}) = ((e_1^i, e_2^j)) = T_{12}^T$  в системе координат  $O_1x_1y_1z_1$ .

Предполагаем, что на расстоянии 20 м линейные размеры изображения НКА на сенсорной матрице видеокамеры составляют более 1/8 и менее 1/2 от максимальных линейных размеров сенсорной матрицы (например, КМОП-матрицы), т.е. при условии, что оптическая ось видеокамеры направлена на НКА, его изображение полностью помещается на сенсорной матрице. На расстоянии 2 м и менее на сенсорной матрице будем иметь фрагмент изображения. Пусть при этом линейные размеры такого фрагмента составляют не менее 1/2 от линейных размеров полного изображения.

Различным ориентации НКА относительно МКА и расстоянию от НКА до МКА соответствует вполне определенный образ на сенсорной матрице (при условии попадания в кадр НКА). Это отображение считаем взаимно-однозначным, т.е. каждому изображению НКА на сенсорной матрице соответствуют вполне определенные ориентация и положение относительно МКА. Для большинства современных КА такое предположение справедливо в силу отсутствия у большинства из них симметрий.

С помощью трехмерной графической модели НКА при заданных параметрах взаимной ориентации и положения НКА и МКА с учетом оптических характеристик видеокамеры можно вычислить изображение, которое получится на сенсорной матрице при этих параметрах. Сравнение этого синтезированного изображения и фактического изображения на сенсорной матрице видеокамеры позволит сделать вывод о правильности или неправильности выбранных параметров. Заметим, что вид фактического изображения существенно зависит от расположения естественных источников освещения на орбите, т.е. от взаимного расположения видеокамеры, Солнца, Земли, Луны и НКА. Поэтому при построении синтезированного изображения желательно знать положение указанных источников освещения.

## **2. Методы построения плоских проекций (изображений) трехмерных графических объектов**

Графические модели трехмерных объектов задаются своей поверхностью и оптическими характеристиками материала. Поверхность определяет геометрию тела, а характеристики материала представляют собой наборы констант, необходимые для расчета различных эффектов, связанных с освещением.

Поверхность объекта может задаваться различными способами, в том числе аналитически. Перед визуализацией поверхность следует представить в виде полигональной (англ. polygon — многоугольник) сетки, аппроксимирующей поверхность плоскими многоугольниками, чаще всего простейшими — треугольниками. Такое описание универсально, однако количество многоугольников может быть большим. Каждый треугольник определяется координатами его вершин, но часто требуется хранить и дополнительные данные. Например, для имитации

гладкой поверхности при расчете освещения по модели Фонга [1] необходимо для каждой вершины треугольника задавать также свой вектор нормали к поверхности. Этот вектор представляет некий усредненный вектор нормали для группы треугольников, смежных по данной вершине.

В зависимости от применяемой модели освещения и особенностей применяемого алгоритма визуализации описание материала должно содержать параметры, позволяющие рассчитывать или имитировать оптические эффекты. Для задачи визуализации модели КА очень важно учитывать отражение и рассеивание света поверхностью. Графическая модель наблюдаемого объекта строится с учетом заданного освещения, существенно влияющего на итоговое изображение. Поэтому далее идет речь о визуализации не объекта, а всей сцены. Сцена имеет свою прямоугольную декартову систему координат и включает в себя описание трехмерной модели объекта, его положение и ориентацию, а также описание источников освещения и их расположение. При этом применяются источники различных типов: точечные и неточечные, ненаправленные и направленные. Для моделирования освещения от естественных сильно удаленных источников (Солнце, Луна, Земля) можно воспользоваться направленными источниками с параллельными лучами. Для моделирования искусственного освещения (например, от фары, размещенной на аппарате) обычно используется точечный направленный источник с расходящимися лучами. Использование неточечных распределенных источников приведет к неоправданно большим вычислительным сложностям.

Для визуализации объекта, заданного своей графической моделью, необходимо определить положение и характеристики абстрактной камеры, на матрицу которой будет проецироваться изображение объектов сцены. С камерой связана своя система декартовых координат. Оси  $x$  и  $y$  задают соответственно направления вправо и вверх на плоскости матрицы видеокамеры, ось  $z$  перпендикулярна плоскости матрицы, направлена противоположно визирной оси камеры. Для камеры наблюдателя задается ее положение и ориентация в системе координат сцены, размеры сторон матрицы, разрешение матрицы и глубина фокуса.

Процесс визуализации трехмерной сцены в современной литературе называется рендерингом (англ. rendering — визуализация). Основные его задачи — проецирование трехмерных объектов на плоскость матрицы камеры (в частности, на плоскость сенсорной матрицы), а также удаление невидимых линий и поверхностей. Результатом работы является буфер кадра — двумерный массив, каждый компонент которого описывает цвет одного пиксела матрицы камеры наблюдателя.

Существует два основных подхода к рендерингу: растеризация и трассировка лучей. Первый подход более быстрый и используется в системах, работающих в режиме реального времени. Плата за скорость — низкая реалистичность изображения, состоящая в невозможности точного расчета эффектов отражения, преломления и рассеивания света, а также в сложности реализации расчета теней. Второй подход — трассировка лучей, более близкий к физическому описанию распространения света, в пределе позволяет получать более реалистичные изображения. Он намного медленнее и в системах реального времени в чистом виде не используется.

**2.1. Метод растеризации.** Последовательно перебираются все треугольники поверхности трехмерной модели, и для каждого проводится две операции:

— **проецирование на плоскость изображения**, вершины треугольника (в  $R^3$ ) перспективно проецируются на плоскость изображения (в  $R^2$ ), получается треугольник на плоскости;

— **растеризация в буфере кадра**, проводится закрашивание пикселов матрицы, которые попали в спроецированный треугольник.

Все геометрические преобразования проводятся в однородных координатах [2]: размерность пространства увеличивается на единицу, и при этом считается, что векторы определяются с точностью до умножения на ненулевое число. Однородные координаты позволяют унифицировать операции поворота и параллельного переноса, сводя их к операции умножения векторов на матрицу. Так если треугольник  $abc$  задан своими вершинами в системе координат сцены, то однородные координаты его вершин записываются в виде

$$a = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 1 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \\ 1 \end{pmatrix}, c = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Положение камеры относительно сцены задается матрицей

$$C = \begin{pmatrix} r_x^1 & r_x^2 & r_x^3 & t_x \\ r_y^1 & r_y^2 & r_y^3 & t_y \\ r_z^1 & r_z^2 & r_z^3 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $R$  — матрица направляющих косинусов, определяющая ориентацию системы координат камеры,  $T$  — вектор, обозначающий положение точки фокуса камеры относительно начала системы координат сцены, в которой заданы объекты.

Для упрощения процедуры проектирования осуществляется переход к системе координат, связанной с камерой. Для этого ко всем объектам сцены применяется преобразование  $C^{-1}$ , координаты треугольника  $a, b, c$  преобразуются в  $\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}$ :

$$\tilde{a} = C^{-1}a, \tilde{b} = C^{-1}b, \tilde{c} = C^{-1}c. \quad (3)$$

Для камеры задано поле зрения — объем, объекты из которого проецируются на матрицу камеры. Для перспективной проекции поле зрения является усеченной пирамидой с вершиной в фокусе (рис. 1).

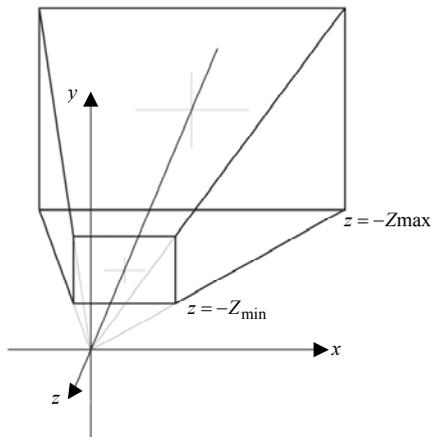


Рис. 1

Величины  $w, h$  — ширина и высота ближайшего к фокусу основания пирамиды,  $f$  — фокусное расстояние камеры. Величины  $Z_{\min}$  и  $Z_{\max}$  задаются для ограничения области видимости по глубине. Эти значения выбираются таким образом, чтобы интересующий объект находился в поле зрения. Все объекты, попавшие в усеченную пирамиду, изображенную на рис. 1, будут проецироваться на ее малое основание.

К вершинам треугольника  $\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}$  применяется преобразование

$$P = \begin{pmatrix} \frac{2f}{w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2f}{h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Z_{\max} + Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} & -2 \frac{Z_{\max} \cdot Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

которое усеченную пирамиду переводит в куб с центром в нуле и сторонами, параллельными координатным осям. Это позволяет упростить процедуру отсеивания тех треугольников, которые в него не попадают и не вносят вклад в изображение. Для этого достаточно проверить, находится хотя бы одна вершина  $\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$ ,  $\tilde{c}$  треугольника в этом кубе:

$$\tilde{a} = P\tilde{a}, \tilde{b} = P\tilde{b}, \tilde{c} = P\tilde{c}. \quad (5)$$

Для каждой вершины треугольника  $\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$ ,  $\tilde{c}$  координаты  $x$  и  $y$  являются нормированными координатами ее проекции на матрицу камеры. После проектирования вершин треугольника проводится его растеризация — запись цветов пикселей.

Координата  $z$  вершин  $\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$ ,  $\tilde{c}$  является расстоянием до матрицы камеры и используется для отбрасывания невидимых поверхностей [3]. Для этого применяется еще один буфер ( $z$ -буфер, двумерный массив, размерность которого равна размерности матрицы камеры), в который при растеризации треугольника для каждого закрашиваемого пикселя заносится интерполируемое значение глубины  $z$ . На этапе растеризации треугольника перед закрашиванием каждого пикселя проводится сравнение текущего значения величины  $z$  со значением, записанным в  $z$ -буфере. В случае, если текущее значение меньше, это означает, что данная точка находится ближе к камере, чем записанная ранее. Тогда в буфере кадра происходит перезаписывание цвета пикселя, а в  $z$ -буфер заносится новое значение глубины.

**2.2. Трассировка лучей.** Подход с использованием трассировки лучей основан на расчете путей распространения света по сцене от источников света к приемнику (камере). Подход позволяет учитывать преломление, отражение, рассеивание и поглощение лучей, естественным образом получая фотореалистичное изображение. Различают прямую и обратную трассировки в зависимости от направления хода лучей.

Менее затратным методом является обратная трассировка [4]: лучи отправляются из фокуса камеры сквозь пиксели матрицы изображения и собирают данные о свете, приходящем по этим лучам (рис. 2). Таким образом, для получения цвета пикселей матрицы изображения достаточно рассчитать только лучи, которые проходят сквозь них и формируют изображение.

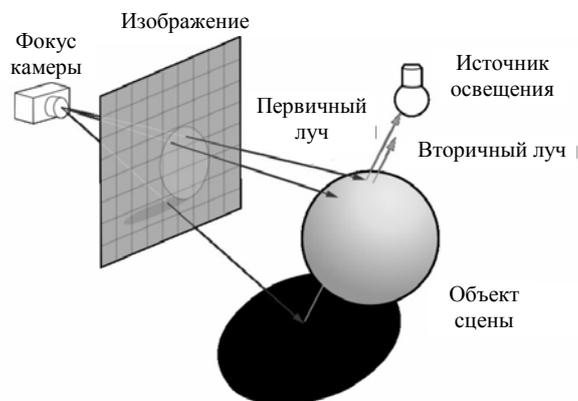


Рис. 2

Проблемой этого подхода является объем вычислений. Количество первичных лучей должно быть не меньше количества пикселей в изображении (через каждый пиксел трассируется не менее чем 1 луч). Проверяется, пересекается ли каждый луч со всеми полигонами (треугольниками), задающими поверхности трехмерных объектов.

Пусть  $S + Vt$  — уравнение луча, где  $S$  — точка в трехмерном пространстве (начало луча),  $V$  — вектор, задающий направление луча, параметр  $t > 0$ . Треугольник, с которым необходимо определить пересечение этого луча, задается вершинами  $a, b, c$ . Каждая точка треугольника  $d$  принадлежит выпуклой оболочке вершин треугольника, т.е.

$$d = ua + vb + (1 - u - v)c, \quad (6)$$

где числа  $u \geq 0, v \geq 0, u + v \leq 1$ . Луч  $S + Vt$  пройдет через точку  $d$ , принадлежащую треугольнику  $abc$ , если найдутся такие числа  $u \geq 0, v \geq 0, u + v \leq 1$  и число  $t > 0$ , при которых выполнится следующее равенство:

$$ua + vb + (1 - u - v)c = S + Vt. \quad (7)$$

Равенство можно записать в виде системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $u, v, t$ :

$$\begin{pmatrix} a_x - c_x & b_x - c_x & -V_x \\ a_y - c_y & b_y - c_y & -V_y \\ a_z - c_z & b_z - c_z & -V_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x - c_x \\ S_y - c_y \\ S_z - c_z \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Пересечение будет существовать, если при решении (8) будет получено  $u \geq 0, v \geq 0, u + v \leq 1, t > 0$ . Из решения также находится расстояние до точки пересечения, что используется для отбрасывания невидимых поверхностей.

Для определения ориентации объекта наблюдения с точностью до малейших поворотов необходима система, позволяющая с высокой точностью визуализировать трехмерную модель. Более того, сама модель должна быть высокоточной, а в случае наличия криволинейных поверхностей содержать большое число аппроксимирующих многоугольников.

Поскольку в космическом пространстве практически все освещение объекта будет определяться направленными источниками, получаемые тени и отражения будут иметь значительный контраст и вносить большой вклад в изображение. В связи с этим важным представляется учет положения основных источников: Солнца, в меньшей степени Земли и Луны.

### 3. Способ определения параметров взаимных ориентации и положения

Размер, вид и положение изображения НКА на сенсорной матрице однозначно связаны с относительным положением и ориентацией НКА относительно МКА. Однако вид обратного отображения, позволяющего по имеющемуся изображению определить параметры взаимных положения и ориентации, в явном виде неизвестен. Поэтому в данной работе для определения этих параметров используется следующий подход. Взаимная ориентация базиса  $e_2^i, i = \overline{1, 3}$ , относительно базиса  $e_1^i, i = \overline{1, 3}$ , может быть определена с помощью трех углов Эйлера —  $\psi, \varphi$  и  $\theta$ . Каждый из них может независимо принимать значения из интервала  $(-\pi, \pi]$  с его центральным нулевым значением, соответствующим желаемым углам при идеальной стыковке. Для вектора  $r_{12}$  относительного положения также можно указать некото-

рое ограниченное множество  $P \subset R^3$  такое, что для любого вектора  $r_{12} \in P$  НКА попадает в поле зрения видеокамеры МКА, т.е. при  $r_{12} \in P$  на сенсорной матрице видеокамеры будет изображение НКА. В простейшем случае в качестве множества  $P$  можно взять параллелепипед

$$P = \{(x, y, z) \in R^3 : \underline{x} \leq x \leq \bar{x} \mid y \mid \leq \bar{y}, \mid z \mid \leq \bar{z}\}, \quad (9)$$

у которого в соответствии с постановкой задачи  $\bar{x} = 20$  м, число  $\underline{x}$  можно взять нулевым,  $\underline{x} = 0$ , в качестве чисел  $\bar{y}$  и  $\bar{z}$  выбираются такие числа, чтобы при значении вектора  $r_{12} \in P$  изображение НКА попадало на сенсорную матрицу. Множество возможных углов Эйлера и множество  $P$  покрывается сеткой дискретных значений с достаточно малым шагом:  $\Delta\alpha^1$  для углов и  $\Delta d^1$  для координат. Для каждой позиции НКА относительно МКА, которая задается набором чисел  $\psi_i, \varphi_j, \theta_k$  и  $x_r, y_s, z_t$ , соответствующим некоторому узлу сетки, строится синтетическое изображение на сенсорной матрице. Это изображение сравнивается с фактическим изображением в соответствии с некоторым критерием. В результате можно будет определить значения параметров  $\hat{\psi}^1, \hat{\varphi}^1, \hat{\theta}^1$  и  $\hat{x}^1, \hat{y}^1, \hat{z}^1$ , при которых синтетическое изображение наилучшим (в смысле выбранного критерия) образом совпадает с фактическим. При достаточно малых шагах разбиения  $\Delta\alpha^1$  и  $\Delta d^1$  эти значения будут отличаться от истинных параметров  $\psi_*, \varphi_*, \theta_*$  и  $x_*, y_*, z_*$  не больше, чем на величину этих шагов, т.е.

$$\begin{aligned} |\hat{\psi}^1 - \psi_*| &\leq \Delta\alpha^1, \quad |\hat{\varphi}^1 - \varphi_*| \leq \Delta\alpha^1, \quad |\hat{\theta}^1 - \theta_*| \leq \Delta\alpha^1, \\ |\hat{x}^1 - x_*| &\leq \Delta d^1, \quad |\hat{y}^1 - y_*| \leq \Delta d^1, \quad |\hat{z}^1 - z_*| \leq \Delta d^1. \end{aligned} \quad (10)$$

В результате получаем уточненные интервалы для истинных параметров взаимного положения и ориентации, а для угла  $\psi_*$  — уточненные границы интервала его возможных значений

$$\underline{\psi}^1 \leq \psi_* \leq \bar{\psi}^1, \quad (11)$$

где  $\underline{\psi}^1 = \hat{\psi}^1 - \Delta\alpha^1$  и  $\bar{\psi}^1 = \hat{\psi}^1 + \Delta\alpha^1$ . По аналогии записываются уточненные интервалы для других параметров. Эти интервалы принадлежности точных значений покрываются сеткой с меньшим шагом разбиения  $\Delta\alpha^2$  и  $\Delta d^2$ . На этой новой сетке вновь определяются наилучшие параметры  $\hat{\psi}^2, \hat{\varphi}^2, \hat{\theta}^2$  и  $\hat{x}^2, \hat{y}^2, \hat{z}^2$ . Точность полученных оценок определяется неравенствами, аналогичными (10). Этот процесс повторяется многократно, пока не будет достигнута требуемая точность оценок параметров ориентации и положения.

Описанный алгоритм в принципе должен сходиться к решению задачи нахождения экстремума непрерывного функционала (в данном случае функции) на ограниченном множестве. При этом процедура последовательного уточнения гарантированных интервалов принадлежности должна обеспечить нахождение ее глобального решения, если задача многоэкстремальна.

#### 4. Способы сравнения изображений

В простейшем случае для установления совпадения фактического изображения  $A$  и синтетического  $B$  можно использовать следующий критерий:

$$J_1 = \sum_{i,j} [(a_{ij}^R - b_{ij}^R)^2 + (a_{ij}^G - b_{ij}^G)^2 + (a_{ij}^B - b_{ij}^B)^2], \quad (12)$$

где  $a_{ij}^R$  — интенсивность красного цвета физического изображения объекта,  $b_{ij}^R$  — интенсивность красного цвета синтетического изображения объекта,  $a_{ij}^G$ ,  $a_{ij}^B$ ,  $b_{ij}^G$ ,  $b_{ij}^B$  — значения аналогичных величин для зеленой и синей составляющих цвета соответствующих изображений. Суммирование проводится по всем пикселям сенсорной матрицы. Очевидно, что значение критерия  $J_1$  будет минимальным (и равным нулю) при совпадении изображений. Для снижения объема используемой информации об изображении можно взять его представление в серых тонах, без указания цвета. В этом случае критерий  $J_1$  приобретает особенно простой вид:

$$J_1 = \sum_{i,j} (a_{ij}^I - b_{ij}^I)^2, \quad (13)$$

где  $a_{ij}^I$  — интенсивность серого оттенка изображения  $A$  (ноль соответствует черному цвету).

Можно использовать критерий

$$J_2 = \sum_{i,j} a_{ij}^I \cdot b_{ij}^I,$$

значение которого будет максимальным при совпадении изображений.

Недостаток этих критериев — необходимость оперировать всеми пикселями сенсорной матрицы и соответственно хранить в памяти большое число достаточно объемных файлов изображений, соответствующих всевозможным значениям параметров взаимных положений и ориентации. Альтернативой этому является подход, при котором вычисление синтетического изображения осуществляется в темпе со временем для каждого значения параметров положения и ориентации из тестовой выборки, что, в свою очередь, повысит требования к быстродействию вычислений. Ниже рассматривается два альтернативных подхода сравнения фактического изображения с синтетическими из тестовой выборки, требующие меньших вычислительных затрат.

#### 4.1. Метод сравнения видеоизображений по информативным признакам.

Предлагается проводить процедуру сравнения не по полному изображению, попавшему в кадр видеокамеры, а использовать только его сингулярные особенности, которые принято называть информативными признаками [5]. При формировании признаков, характеризующих объект наблюдения, целесообразно использовать те данные видеоизображения, которые менее чувствительны к изменению внешних условий. В качестве таковых лучше всего брать конструктивные особенности, в частности границы всего объекта или отдельных его фрагментов, попавших в кадр, на которых интенсивность видеосигнала изменяется скачками, или с большим градиентом, близким к скачку. Таким границам соответствуют изломы поверхности типа ребер, выступов, отверстий, линии сопряжений тел разной формы и т.д. Например, это может быть контурное изображение сопла двигательной установки при сближении с его стороны, отдельные его части или кольцо крепления спутника на ракетноносителе, имеющего стандартный размер.

Виртуальная модель, с которой будет сравниваться изображение, формируется по тем же признакам. Очевидно, что выбранные признаки объекта должны быть информативными в том смысле, что их плоское изображение при разных ориен-

тациях и положении претерпевает существенные изменения. Например, плоское кольцо, перпендикулярно ориентированное к линии наблюдения, превращается при вариациях ориентации в эллипс со значениями радиусов, существенно зависящих от углов поворота, сближения или удаления.

Рассмотрим один из возможных алгоритмов сравнения реального и виртуального изображения объекта, базирующийся на использовании информативных признаков. Для каждого изображения определяются характерные параметры, значения которых зависят от взаимных ориентаций и положения виртуальной модели и объекта. Такими параметрами вышеупомянутого кольца являются радиусы деформирующихся эллипсов.

Возьмем в качестве информативного признака контур всего объекта или крупного его фрагмента в случае, когда внешняя граница находится за пределами кадра. Сформируем совокупность параметров контура, изображающего объект, по значениям которых будем осуществлять процедуру сравнения. Построим на сенсорной матрице прямоугольник, который является описанным по отношению к контуру, т.е. контур и прямоугольник имеют общие точки сверху, снизу и с боков. При этом стороны прямоугольника параллельны сторонам сенсорной матрицы. Тогда в качестве характерных параметров возьмем следующие отношения.

- Относительные координаты верхней и нижней сторон прямоугольника на сенсорной матрице (отношение числа пикселей, отсчитываемых по вертикали, между верхней границей сенсорной матрицы и верхней (нижней) стороной прямоугольника к общему числу пикселей между соответствующими границами сенсорной матрицы). Это даст два характерных параметра контура:  $N_1$  и  $N_2$ .

- Относительные координаты боковых сторон прямоугольника, вычисленных через отношение числа пикселей, отсчитываемых от левой стороны сенсорной матрицы, по горизонтали аналогично предыдущему. Получим еще два параметра контура:  $N_3$  и  $N_4$ .

- Отношение ширины прямоугольника к его высоте, умноженное на 100, что дает  $N_5$ .

- Отношение числа черных пикселей в прямоугольнике, соответствующих фоновым и находящимся между границами контура и прямоугольника к общему числу пикселей внутри прямоугольника, что дает  $N_6$ .

- Отношение общего числа пикселей внутри контура объекта к общему числу пикселей сенсорной матрицы, что дает  $N_7$ .

Заметим, что выбранные значения  $N_1 - N_7$  заметно изменяются при варьировании ориентации. Более того, зависимость каждого из них от вектора взаимной ориентации и положения  $q = (x, y, z, \varphi, \psi, \theta)$  такова, что каждому  $q$  можно поставить в соответствие взаимно-однозначный набор из  $(N_1, \dots, N_7)$ .

При разных значениях параметров взаимного положения и ориентации с использованием графической трехмерной модели строятся соответствующие реальному объекту контурные изображения на виртуальной сенсорной матрице. Для каждого из них определяются значения параметров  $N_1 - N_7$ . Их связь с параметрами положения и ориентации представим в виде лексикографического дерева [6, 7], которое формируется следующим образом. На стволе дерева откладываем значения параметра  $N_1$  и соответствующие им подмножества ориентаций, имеющие одинаковые значения  $N_1$ . Задаем точку начала ветвлений, соответствующую минимальному значению этого параметра. Тогда вершиной дерева будет точка с мак-

симальным значением  $N_1$ . Далее по признаку  $N_2$  присоединяем к стволу боковые ветви. Начало ветви соответствует тем подмножествам параметров положения и ориентации, которые одинаковы по признаку  $N_1$ . На каждой ветви в лексикографически возрастающем порядке, начиная от минимального, располагаем подмножества ориентаций с одинаковыми признаками  $N_1$  и  $N_2$ . От каждой точки боковой ветви, соответствующей этому множеству, строим по признаку  $N_3$  вторичные ветви, лексикографически упорядочивая каждое такое подмножество по признаку  $N_3$ . Если по признаку  $N_3$  все вторичные ветви стали однозначными по параметрам положения и ориентации (т.е. подмножество состоит из одного элемента), то на этом этапе построение дерева прекращается: все вторичные ветви голые. Если же остаются ветви, которые в определенных точках с параметром  $N_3$  соответствуют некоторому подмножеству ориентаций, то продолжаем наращивать дерево по третичным ветвям, ответвляющихся от точек с подмножеством ориентаций. Ответвления осуществляются также с лексикографическим упорядочиванием по  $N_4$ . Этот процесс формирования дерева продолжается до тех пор, пока все ответвления по признакам не превратятся в голые ветви с одним значением ориентации и положения. Дерево построено. Для фактического изображения НКА на основе информативных признаков последовательно определяются параметры  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  и т.д. На построенном дереве последовательно продвигаемся от точки  $N_1$  на стволе к  $N_2$  на первом ответвлении и т.д. Решением является точка на голой ветви.

Можно оптимизировать построение дерева таким образом, чтобы поиск положения и ориентации осуществлялся по наикратчайшему пути. Для этого вводится понятие степени информативности параметра  $N_1$  по длине информативного участка ствола и размеру подмножеств положения и ориентации с одинаковыми значениями  $N_1$ . Точно так же по длине ветвей и размерам подмножеств будет оцениваться информативность других параметров. Чем более информативны признаки, тем меньше разветвлений у дерева. Тогда для каждого объекта следует подбирать свой набор информативных признаков и характерных параметров.

После того как по информативным данным построено соответствующее им дерево, формируется специально структурированная под него база данных в виде упорядоченного семейства подмножеств и алгоритм поиска. Процесс распознавания ориентации состоит из последовательного продвижения по точкам разветвления, определяемым по значениям параметров фактического изображения наблюдаемого объекта, к конечной точке голой ветви.

Преимущество рассмотренного метода в том, что распознавание осуществляется не по всем сигналам на пикселах, а только по выделяемым параметрам. К его недостаткам можно отнести нестрогое обоснованный, а по сути, субъективный выбор информативных признаков и параметров.

**4.2. Сравнение изображений методами линейной алгебры.** Основу изложенного в разд. 3 алгоритма определения параметров относительного положения и ориентации НКА составляет алгоритм сравнения фактического снимка, полученного на сенсорной матрице видеокамеры МКА, с некоторым набором предварительно заготовленных синтетических изображений НКА с известными параметрами ориентации и положения относительно МКА.

Будем считать изображение монохромным. В этом случае снимок характеризуется битовой картой, т.е. матрицей размера  $n \times m$ , каждый элемент которой характеризует интенсивность серого оттенка. Таким образом, снимок идентичен некоторой числовой матрице размера  $n \times m$ . Пространство числовых матриц пред-

ставляет собой линейное пространство размерности  $n \times m$ , а множество синтетических изображений из тестовой выборки длины  $p$  — некоторое подмножество  $I$  этого пространства,  $I \subseteq R^{n \times m}$ . Для хранения в памяти компьютера тестовой выборки, очевидно, требуется  $n \times m \times p$  ячеек памяти. Пусть размерность линейной оболочки  $L(I)$  множества  $I$  равна  $\tilde{p}$ . Очевидно, что

$$\tilde{p} \leq \min(n \times m, p).$$

Если окажется, что  $\tilde{p} < \min(n \times m, p)$ , то для хранения элементов тестовой выборки можно использовать меньшее число ячеек памяти:  $n \times m \times \tilde{p} < n \times m \times p$ . Более того, можно использовать некоторое линейное подпространство  $\tilde{L} \subseteq R^{n \times m}$  размерности  $\tilde{p} < \min(n \times m, p)$ , на которое проецировать элементы тестовой выборки [8]. В результате такой проекции каждое изображение будет характеризоваться конечным набором своих координат в подпространстве  $\tilde{L}$ . Такая процедура в некотором смысле аналогична сравнению изображений с помощью информативных признаков. Однако в данном случае информативные признаки выделяются формальным образом. Опишем способ построения такого линейного подпространства  $\tilde{L}$ .

Матрица размера  $n \times m$  каждого изображения из тестовой выборки преобразуется в  $nm$ -вектор последовательным выстраиванием столбцов матрицы в один ряд. Результатом этой операции будет набор из  $p$  векторов.

Для построения ортонормированного базиса линейной оболочки набора из  $p$  векторов сформируем из указанного набора прямоугольную матрицу  $A$  размера  $nm \times p$  и применим к ней процедуру сингулярного (SVD) разложения:

$$A = U \Sigma V^T \quad (14)$$

где  $U$ ,  $V$  — ортогональные матрицы порядка  $nm$  и  $p$  соответственно;  $\Sigma$  —  $nm \times p$ -матрица, на главной диагонали которой расположены сингулярные числа матрицы  $A$ , остальные элементы нулевые. Сингулярные числа обобщают понятие собственного числа на случай прямоугольных матриц. Они определяются как квадратные корни собственных значений матриц  $A^T A$  и  $A A^T$ , которые являются общими для этих матриц. Представление (14) дает возможность выделить ортонормированный базис, соответствующий исходной тренировочной выборке. Действительно, любую линейную комбинацию векторов матрицы  $A$  можно представить как результат преобразования вектора, составленного из коэффициентов линейной комбинации, линейным отображением с матрицей  $A$ . Согласно геометрическому смыслу SVD-разложения [9] матрица  $U$  составлена из векторов главных осей эллипсоида, в который под действием матрицы  $A$  переходит единичная сфера с центром в начале координат; сингулярные числа отвечают размерам главных полуосей того же эллипсоида. Очевидно, что этот эллипсоид принадлежит линейной оболочке, натянутой на столбцы матрицы  $A$ , каждый из которых соответствует изображению из тестовой выборки. Число ненулевых осей эллипсоида равно размерности этого подпространства. Зададимся некоторым числом  $\tilde{p}$  и в качестве базиса линейного подпространства выберем  $\tilde{p}$  векторов матрицы  $U$ , соответствующим  $\tilde{p}$  максимальным значениям сингулярных чисел, или зададимся некоторым пороговым числом  $\Delta > 0$ . В качестве векторов базиса возьмем векторы матрицы  $U$ , у которых соответствующие сингулярные числа больше  $\Delta$ . Количество таких векторов обозначим  $\tilde{p}$ . Тогда столбцы матрицы  $U$  с номерами  $1, \dots, \tilde{p}$  образуют ортонормированный базис линейной оболочки.

Имея ортонормированный базис  $u^1, \dots, u^{\tilde{p}}$  столбцов ортогональной матрицы  $U$ , любому вектору  $e \in R^{n \times m}$ , отвечающему заданному изображению размера  $n \times m$ , можно поставить в соответствие вектор

$$c = \sum_{i=1}^{\tilde{p}} c_i u^i, \quad (15)$$

где коэффициенты разложения  $c_i = (e, u^i)$  — скалярные произведения заданного вектора  $c$  с каждым из базисных векторов. Вектор  $c$  — проекция вектора  $e$  на подпространство, натянутое на векторы  $u^1, \dots, u^{\tilde{p}}$ . Набор чисел  $(c_1, c_2, \dots, c_{\tilde{p}})^T$  является координатами вектора  $c$  в базисе  $u^1, \dots, u^{\tilde{p}}$ . Указанным образом находятся проекция  $c$  изображения, полученного с помощью видеокамеры, и проекции  $w^k$  ( $k = 1, \dots, p$ ) всех синтетических изображений, принадлежащих тренировочной выборке.

После того как найдены представления (15) в базисе  $u^1, \dots, u^{\tilde{p}}$ , необходимо подобрать изображение из тренировочной выборки, ближайшее к заданному. Для этого среди элементов множества  $\{w^k\}_{k=1}^p$  выберем такой вектор  $w^s$ , евклидова норма разности  $\|w^s - c\|$  для которого минимальна. В силу ортонормированности базиса  $u^1, \dots, u^{\tilde{p}}$  норма  $\|w^s - c\|$  в этом базисе имеет вид

$$\|w^s - c\| = \sqrt{(w^s - c, w^s - c)} = \sum_{i=1}^{\tilde{p}} (w_i^s - c_i)^2, \quad (16)$$

а условие минимальности можно записать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{\tilde{p}} (w_i^s - c_i)^2 \leq \sum_{i=1}^{\tilde{p}} (w_i^k - c_i)^2 \quad \forall k. \quad (17)$$

Напомним, что для изображений из тренировочной выборки параметры положения и ориентации известны. Таким образом, отыскание изображения  $w^s$ , удовлетворяющего условию (17), позволяет определить приближенное значение параметров взаимного положения и ориентации.

Для повышения помехоустойчивости (по отношению, например, к цифровым шумам и затенениям) вместо (16) используется [8] следующее выражение для нормы:

$$\|w^s - c\|_\rho = \sum_{i=1}^{\tilde{p}} \rho(w_i^s - c_i),$$

где функция  $\rho(x) = x^2 / (\sigma^2 + x^2)$  ( $\sigma$  — эмпирический параметр).

## 5. Результаты моделирования

Для проведения моделирования построена трехмерная графическая модель НКА, состоящая из прямоугольного параллелепипеда с линейными размерами  $3 \times 3 \times 5$  метров и расположенных на плоскости стыковки дополнительных элементов конструкции: кольца крепления спутника к ракетноносителю, сопла и нескольких мелких деталей. Система освещения, имитирующая Солнце, задавалась одним бесконечно удаленным точечным источником.

Методом трассировки лучей было построено  $K = 5^6 = 15625$  синтетических изображений, соответствующих изображениям НКА на сенсорной матрице

видеокамеры для всех возможных комбинаций параметров положения  $(x, y, z)$  и ориентации  $(\psi, \varphi, \theta)$  НКА относительно МКА, принимающих пять различных значений:

$$\begin{aligned} x &\in \{-12, -11, -10, -9, -8\}, \\ y &\in \{-2, -1, 0, +1, +2\}, \\ z &\in \{-2, -1, 0, +1, +2\}, \\ \psi &\in \{-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, +10^\circ, +20^\circ\}, \\ \varphi &\in \{-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, +10^\circ, +20^\circ\} \\ \theta &\in \{-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, +10^\circ, +20^\circ\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Для ускорения расчетов было выбрано низкое разрешение изображений:  $n = 100$ ,  $m = 100$ .

Задача определения ориентации сводится к сравнению фактического изображения  $A$ , полученного видеокамерой МКА, с набором  $K$  синтетических изображений  $B_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , и нахождению из них наиболее близкого в смысле выбранного критерия сравнения. Решение задачи нахождения ближайшего изображения проводилось тремя различными способами, изложенными в статье. После этого определялись новые уточненные (более узкие) интервалы для значений каждого из параметров ориентации и положения. В каждом из этих интервалов вновь выделялось пять чисел и цикл определения параметров ориентации и положения повторялся (см. разд. 3). Ниже представлены результаты только для первой тестовой выборки, так как в ней тестовые изображения заметно отличаются и это можно увидеть визуально.

Исходными данными для этой задачи при использовании критерия  $J_1$  являются:

- 1) фактическое изображение  $A$ , размером  $n \times m$  пикселей, хранящееся в ОЗУ;
- 2) набор синтетических изображений  $B_k$ , размером  $n \times m$  пикселей каждое, хранящихся в ПЗУ.

Нахождение ближайшего к  $A$  изображения из набора  $B_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , при использовании критерия (13) предполагает проведение попиксельного сравнения изображений. В случае совпадения сравниваемых изображений критерий принимает минимальное значение:  $J_1(A, A) = 0$ . Вычисление  $\arg \min_{k=1, K} J_1(A, B_k)$  позволяет получить близкое к  $A$  синтетическое изображение и оценку взаимного положения и ориентации.

При решении задачи первым способом для каждого синтетического изображения из набора необходимо найти функционал  $J_1(A, B_k)$ . Эта операция наиболее затратная, поскольку количество необходимых арифметических действий определяется количеством пикселей в изображении, которое может быть велико. Вычислительная сложность данного метода пропорциональна  $n \cdot m \cdot K$ .

Рассматривалось две ситуации: изображение НКА полностью помещается в кадре (рис. 3) и частично (рис. 4). В обоих случаях фактические параметры положения и ориентации не совпадали с набором дискретных значений этих параметров для тестовой выборки, т.е. оба изображения не принадлежат набору  $B_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ .

На рис. 3 фактическое изображение  $A$  (левое) соответствует ориентации  $(x, y, z, \psi, \varphi, \theta) = (-10, 1, -1, 7, 1, 3, 19^\circ, 11^\circ, -10^\circ)$ . Справа на рис. 3 показано изображение из набора  $B_k$ , наиболее близкое к  $A$  по критерию  $J_1(\cdot)$ .

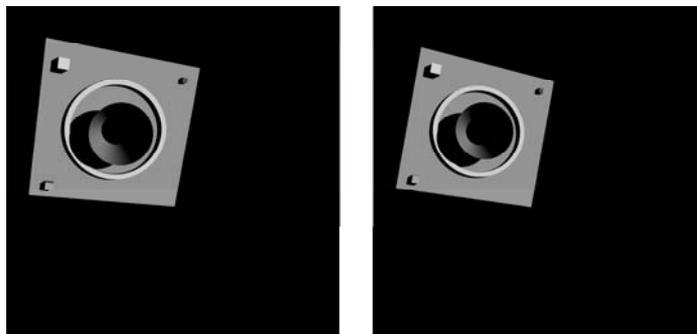


Рис. 3

Алгоритм выбора изображения по критерию  $J_1(\cdot)$  также хорошо отработал во второй ситуации, когда НКА виден на кадре лишь частично. Параметры ориентации и положения были следующими:  $(x, y, z, \psi, \varphi, \theta) = (-8, 1, 1, -1, 9, 9^\circ, 19^\circ, -8^\circ)$ , фактическое изображение расположено на рис. 4 слева, изображение, выбранное по критерию  $J_1(\cdot)$  из тестовой выборки, справа.



Рис. 4

Далее для этих вариантов было проведено несколько циклов уточнения параметров ориентации и положения. На четвертом цикле изображения из тестовой выборки стали практически неразличимы в силу низкого разрешения изображений. При этом была достигнута точность по углам ориентации  $\Delta\alpha^5 = 0,64^\circ$  по определению координат  $\Delta d^5 = 0,15$  м.

Решение этой же задачи было получено с помощью информативных признаков. В качестве входной информации использовалось изображение НКА с параметрами положения и ориентации  $(x, y, z, \psi, \varphi, \theta) = (-8, 1, -2, 10^\circ, 20^\circ, -10^\circ)$ , которые совпадали с одной из конфигураций из тестовой выборки. Для каждого упрощенного контурного изображения из тестовой выборки задавался набор чисел  $(N_1, \dots, N_7)$  информационных параметров. Работа алгоритма начиналась с определения набора  $(\hat{N}_1, \dots, \hat{N}_7)$  для изображения НКА. Далее, из исходной выборки удалялись те наборы, у которых  $N_1 \neq \hat{N}_1$  и т.д. в соответствии с алгоритмом, описанным в п. 4.1. По сути, этот алгоритм является проходом по лексикографическому дереву [10]. На рис. 5 приведен график числа оставшихся вариантов по мере анализа информационных признаков.

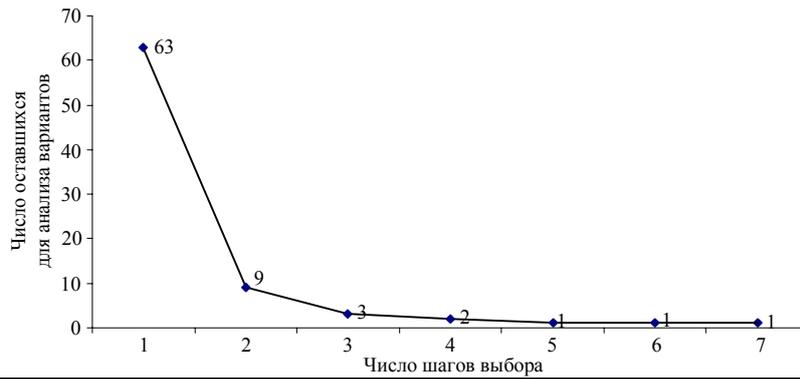


Рис. 5

Как видно из графика, уже после четырех признаков остается ровно одно искомое изображение. На рис. 6 приведено два изображения, которые остались на третьем шаге прохода по лексикографическому дереву. Оказывается, данные изображения отличаются лишь по координате  $x$ , у правого изображения она на 1 м меньше, чем у левого. Уже на четвертом шаге алгоритм распознает истинную ориентацию, которая в силу выбранного варианта определяется точно.

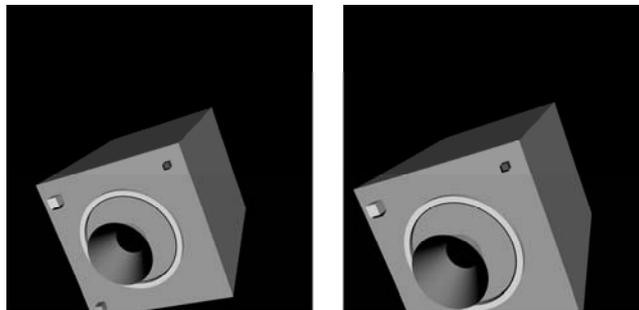


Рис. 6

К сожалению, третий вариант сравнения изображений оказался очень трудоемким. В первую очередь это было связано с относительно большой размерностью матрицы  $A$ :  $10000 \times 15625$ , и определить для нее сингулярное разложение с высокой точностью оказалось весьма сложной задачей. Вычислительные затраты на этапе подготовки данных, а именно определения базиса  $u^1, \dots, u^{\tilde{p}}$ , существенно превысили затраты первых двух методов. Однако на этапе сравнения изображений при  $\tilde{p} = 8$  вычислительные затраты были ниже, чем затраты при сравнении изображений с использованием информативных признаков.

### Заключение

В данной работе рассматривалось несколько подходов для определения параметров взаимных положения и ориентации НКА и МКА. Проведенное имитационное моделирование продемонстрировало принципиальную возможность определения этих параметров по видеоснимкам НКА. Лазерный дальномер при этом используется как контрольный прибор. При существенном расхождении его показаний и расстояния  $\|r_{12}\|$ , вычисленного по видеоизображениям, процесс сближения и стыковки следует прекратить для выяснения причин этого расхождения.

Точность определения параметров положения и ориентации определяется характеристиками оптической системы видеокамеры, но лимитируется разрешающей способностью сенсорной матрицы.

В дальнейшем предполагается рассмотреть оптимизацию алгоритмов, исследовать их помехоустойчивость, провести натурные испытания с использованием физических снимков.

*В.Ф. Губарев, В.П. Боюн, С.В. Мельничук, М.М. Сальніков,  
В.О. Сімаков, Л.А. Годунок, В.І. Комісаренко,  
В.Ю. Добровольський, С.В. Деркач, С.А. Матвієнко*

## ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДНОСНОГО РУХУ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Розглянуто задачу визначення параметрів відносних положення і орієнтації пасивного КА щодо активного КА з використанням тривимірної графічної моделі і даних відеозйомки для зближення і стикування. Запропоновано метод визначення взаємного положення і орієнтації на основі порівняння фактичного зображення, отриманого відеокамерою, з зображеннями КА, для яких відомі параметри взаємного положення і орієнтації. Запропоновано та розглянуто три підходи до порівняння зображень. Наведено результати імітаційного моделювання роботи методу з визначення параметрів взаємного положення і орієнтації для всіх трьох підходів порівняння зображень, проаналізовано їх переваги та недоліки.

*V.F. Gubarev, V.P. Boyun, S.V. Melnychuk, N.N. Salnikov,  
V.A. Simakov, L.A. Godunok, V.I. Komisarenko,  
V.Yu. Dobrovolsky, S.V. Derkach, S.A. Matviyenko*

## APPLICATION OF VISION SYSTEMS FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF RELATIVE MOTION OF SPACECRAFTS

The problem of determining the parameters of the relative position and attitude of a passive noncooperative spacecraft with respect to the active spacecraft using 3-D graphical model and video data for the rendezvous and docking purposes. A method for determining the relative position and orientation based on a comparison of the image obtained by the video camera, with satellite images and known parameters of relative position and attitude is proposed. Three approaches to image comparisons are proposed and discussed. The simulation results of the method of determining the parameters of relative position and attitude for all three image comparison approaches are presented, their advantages and disadvantages are analyzed.

1. *Phong B.T.* Illumination for computer generated pictures // Communications of ACM. — 1975. — **18**, N 6. — P. 311–317.
2. *Хартсхорн Р.* Основы проективной геометрии. — М.: Мир, 1970. — 161 с.
3. *Catmull E.E.* A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces // PhD thesis, The University of Utah, 1974. — 84 p.
4. *Appel A.* Some techniques for shading machine renderings of solids // Proceedings of the Spring Joint Computer Conference. — 1968. — **32**. — P. 37–49.
5. *Васильева Н.С.* Методы поиска изображений по содержанию // Программирование. — 2009. — № 3. — С. 51–80.
6. *Берж К.* Теория графов и ее применение. — М.: Изд-во иностр. лит., 1962. — 319 с.
7. *Харари Ф.* Теория графов. — М.: Мир, 1973. — 301 с.
8. *Black M.J., Jepson A.D.* EigenTracking: Robust matching and tracking of articulated objects using a view-based representation // International Journal of Computer Vision. — 1998. — **26**, N 1. — P. 63–84.
9. *Trefethen L.N., Bau D.* Numerical linear algebra. — Philadelphia: SIAM, 1997. — 361 p.
10. *Котов В.М., Соболевская Е.П.* Структуры данных и алгоритмы: теория и практика. — Минск: Изд-во БГУ, 2004. — 252 с.

*Получено 03.08.2016*