

ISSN 2075 - 6836

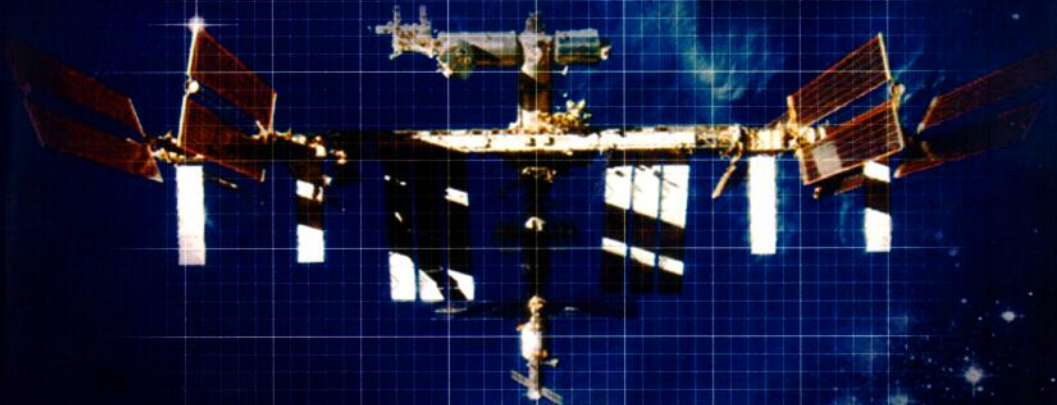
**ИКИ**  
ИНСТИТУТ  
КОСМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
РАН

ЧЕТВЁРТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

## СБОРНИК ТРУДОВ

8-11 СЕНТЯБРЯ 2014, РОССИЯ, ТАРУСА



МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

МОСКВА  
2015

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ЧЕТВЁРТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**СБОРНИК ТРУДОВ**

8–11 сентября 2014 года, Россия, Таруса

Под редакцией  
Г. А. Аванесова

Серия «Механика, управление и информатика»

МОСКВА  
ИКИ РАН  
2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
<i>Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Фори А. А., Куделин М. И.</i> Анализ современного состояния и перспектив развития приборов звёздной ориентации семейства БОКЗ .....	6
<i>Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Брысин Н. Н., Куркина А. Н., Лискив А. С., Людомирский М. Б., Каютин И. С., Ямщиков Н. Е., Гаврилов А. Л., Гульцов С. В., Степанов Ю. В.</i> Астроинерциальная навигационная система .....	21
<i>Белинская Е. В., Воронков С. В., Никитин А. В., Строилов Н. А., Яскович А. Л.</i> Влияние формы одиночной звезды на точностные характеристики системы датчиков гида телескопа Т-170М .....	38
<i>Белинская Е. В., Воронков С. В., Катасонов И. Ю., Никитин А. В., Строилов Н. А.</i> Калибровка системы датчиков гида телескопа Т-170М .....	55
<i>Белинская Е. В., Воронков С. В., Катасонов И. Ю., Строилов Н. А., Пискунов А. Э., Чупина Н. В.</i> Отработка программно-алгоритмического обеспечения системы датчиков гида при натуральных и стендовых испытаниях .....	66
<i>Чубей М. С., Бахолдин А. В., Куприянов В. В., Левко Г. В., Львов В. Н., Маркелов С. В., Цекмейстер С. Д., Цуканова Г. И.</i> К вопросу о системе наведения в проекте «Орбитальная звёздная стереоскопическая обсерватория» .....	85
<i>Иванов Д. С., Ивлев Н. А., Карпенко С. О.</i> Исследование алгоритмов определения ориентации для микроспутников серии «ТаблетСат» .....	95
<i>Стекольников О. Ю., Абубекеров М. К., Байгуттуев А. А., Бирюков А. В., Захаров А. И., Крусанова Н. Л., Миронов А. В., Мошкалёв В. Г., Прохоров М. Е., Тучин М. С.</i> Малогобаритный датчик звёздной ориентации для наноспутников .....	109
<i>Карелин А. Ю., Зыбин Ю. Н., Князев В. О., Поздняков А. А.</i> Многоголовый звёздный датчик 348К. Результаты наземной экспериментальной отработки .....	120
<i>Федосеев В. И., Куняев В. В., Исаков А. Н., Юдина Л. М., Князев В. О., Коптев А. А., Титов Г. П., Шевляков О. В., Латынцев С. В.</i> Обеспечение сбоеустойчивости приборов звёздной ориентации, построенных на сбоеустойчивой элементной базе .....	129
<i>Прохоров М. Е., Захаров А. И., Жуков А. О., Миронов А. В., Стекольников О. Ю.</i> Солнечный датчик на основе интерференционной оптической системы .....	142
<i>Бессонов Р. В., Караваева Е. С., Эльяшев Я. Д.</i> Исследование характеристик КМОП-матрицы датчика изображения CMOSIS CMV-4000 .....	148
<i>Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Сметанин П. С.</i> Первичная обработка информации в звёздном датчике ориентации .....	159
<i>Прохорова С. А.</i> Общие принципы построения контрольно-испытательной аппаратуры оптико-электронных приборов .....	175

<i>Эльяшев Я. Д., Бессонов Р. В., Полянский И. В., Прохорова С. А., Жуков Б. С.</i> Алгоритмы работы съёмочных камер служебной телевизионной системы космического аппарата «Луна-Глоб» .....	181
<i>Никитин А. В.</i> Использование служебной телевизионной системы для контроля и наведения лунного манипуляторного комплекса космического аппарата «Луна-Глоб» .....	206
<i>Байгуттуев А. А., Бирюков А. В., Захаров А. И., Мошкалёв В. Г., Николаев Ф. Н., Прохоров М. Е., Тучин М. С.</i> Стенд для исследования эффективности бленд на основе горизонтального солнечного телескопа ГАИШ .....	221
<i>Елубаев С. А., Алипбаев К. А., Шамро А. В., Бопеев Т. М., Сухенко А. С., Михайленко Д. Л.</i> Разработка стенда для тестирования программно-математического обеспечения звёздного датчика .....	228
<i>Жуков А. О., Захаров А. И., Прохоров М. Е., Мошкалёв В. Г., Шахов Н. И., Зиновьев И. А.</i> Моделирование фона неба в широком спектральном диапазоне в околоземном космическом пространстве .....	235
<i>Бунтов Г. В., Верховица А. В., Забиякин А. С., Князев А. Н., Циллорик А. И.</i> Методы объективного контроля точностных характеристик звёздного датчика ...	246
<i>Разживалов П. Н.</i> Определение величины отклонения от перпендикулярности фоточувствительной матрицы по отношению к оптической оси объектива, возникающего вследствие тепловой деформации звёздного датчика .....	254
<i>Верховица А. В., Забиякин А. С., Мозгунов Д. И., Соколов С. А., Циллорик А. И.</i> Иерархический звёздный каталог, предназначенный для режима слежения звёздного датчика .....	263
<i>Завгородний Д. С., Сокольский М. Н., Трегуб В. П., Полянский И. В.</i> Оптические системы малогабаритных сканеров дистанционного зондирования Земли для космических аппаратов «Метеор-М» .....	269
<i>Кондратьева Т. В., Жуков Б. С., Аванесов Г. А., Полянский И. В.</i> Сопоставление коэффициентов яркости природных объектов по данным комплекса многозональной спутниковой съёмки космических аппаратов «Метеор-М» № 1 и 2 и спектрорадиометра MODIS космического аппарата Тетра .....	276
<i>Жуков Б. С., Жуков С. Б.</i> Возможности космической навигации по планетному горизонту в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне .....	293
<i>Никифоров М. Г., Захаров А. И., Прохоров М. Е., Галушина Т. Ю., Жуков А. О.</i> Оценка возможности практической реализации автономной навигации космических аппаратов в дальнем космосе по астероидам .....	311
<i>Гришин В. А.</i> Грубая оценка местной вертикали и радиуса Земли в задаче корреляционно- экстремальной навигации по изображению Земли .....	323
<i>Жуков А. О., Харламов Г. Ю., Турлов З. Н., Валяев И. Н., Капоров И. В.</i> Высокоточная система навигационно-баллистического обеспечения сверхмалых космических аппаратов .....	332
<i>Маштаков Я. В., Ткачёв С. С.</i> Использование маховиков для управления вектором тяги при перелёте Земля-Луна .....	340
<i>Латынцев С. В., Меус С. В., Овчинников А. В., Бабанов А. А.</i> Оценка эффективности алгоритма управления приводом солнечных батарей космического аппарата с целью создания моментов для разгрузки электрохимического исполнительного органа системы ориентации и стабилизации .....	348
<i>Гладышев В. О., Портнов Д. И., Кауц В. Л., Терешин А. А.</i> Исследование процесса распространения когерентного электромагнитного излучения в движущихся средах .....	353

## РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА

*С. А. Елубаев, К. А. Алипбаев, А. В. Шамро, Т. М. Бопеев, А. С. Сухенко, Д. Л. Михайленко*

Дочернее товарищество с ограниченной ответственностью (ДТОО)  
Институт космической техники и технологий (ИКТТ), Алматы, Республика Казахстан

Звёздный датчик является высокотехнологичным и высокоточным прибором для определения углового положения космического аппарата (КА). В последнее время он становится неотъемлемой частью систем управления движением и навигации космического аппарата. Одна из наиболее наукоёмких частей звёздного датчика — его программно-математическое обеспечение, для тестирования и проверки которого необходимо разрабатывать различное испытательное оборудование. В статье рассматривается разработка стенда для отработки программно-математического обеспечения звёздного датчика по определению текущих параметров его ориентации.

*Ключевые слова:* звёздный датчик, стенд, программно-математическое обеспечение.

### ВВЕДЕНИЕ

На заключительной стадии разработки комплектующих космического аппарата перед разработчиками встаёт вопрос о проведении их контроля и тестирования, позволяющего определить и устранить погрешности и возможные ошибки изготовления технических деталей и программного обеспечения. Как правило, данный вопрос решается путём создания различного испытательного оборудования, стендов или имитаторов, которые позволяют воспроизводить условия космического пространства в наземных условиях.

В данной статье рассматривается задача тестирования и отработки программно-математического обеспечения звёздного датчика с помощью лабораторного стенда, разрабатываемого в рамках проекта в ДТОО Институт космической техники и технологий (Алматы, Республика Казахстан).

### 1. СТРУКТУРА СТЕНДА

Стенд состоит из корпуса, прототипа звёздного датчика на основе веб-камеры и двух персональных компьютеров. Один из персональных компьютеров (ПК1) с монитором высокого разрешения представляет собой имитатор звёздного неба, на котором воспроизводится его изображение с учётом динамики космического аппарата. На втором персональном компьютере (ПК2) выполняется бортовое программное обеспечение прототипа звёздного датчика и программное обеспечение стенда. Схема стенда приведена на рис. 1.

**Елубаев** Сулеймен Актлеуович — заведующий лабораторией

**Алипбаев** Кауныш Арингожаевич — заместитель заведующего лабораторией, доктор философии по специальности механика

**Шамро** Александр Валентинович — заведующий сектором

**Бопеев** Тимур Маратович — заведующий сектором

**Сухенко** Анна Сергеевна — заведующая сектором, anna.sukhenko@gmail.com

**Михайленко** Дарья Леонтьевна — научный сотрудник



Рис. 1. Схема стенда для тестирования программно-математического обеспечения звёздного датчика

При разработке структуры стенда руководствовались следующими требованиями:

- стенд должен обеспечивать отладку бортового программного обеспечения звёздного датчика по определению его текущего углового положения;
- имитатор звёздного неба должен обеспечивать отображение на экране монитора фрагмента звёздного неба, соответствующего текущему положению космического аппарата на орбите и положению оптической оси звёздного датчика;
- монитор имитатора звёздного неба должен иметь разрешение  $3840 \times 2160$ ;
- корпус стенда должен обеспечивать размещение и надёжную фиксацию монитора имитатора звёздного неба и прототипа звёздного датчика, а также их защиту от внешних источников света;
- прототип звёздного датчика должен определять свою ориентацию по снимку звёздного неба; для стенда в качестве прототипа звёздного датчика использована веб-камера, программно-математическое обеспечение стенда запускается на ПК2.

## 2. ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТЕНДА

Основной сложностью лабораторного стенда является программное обеспечение имитатора звёздного неба и прототипа звёздного датчика.

Программное обеспечение имитатора звёздного неба должно обеспечивать отображение на экране монитора фрагмента звёздного неба, который мог быть получен с помощью звёздного датчика, установленного на борту космического аппарата. Для отображения звёздного неба на экране монитора используется звёздный каталог HIPPARCOS (High Precision Parallax Collecting Satellite — «высокоточный спутник для сбора параллаксов»; название созвучно с именем древнегреческого астронома Гиппарха (*др.-греч.* Ἰππάρχος), составителя первого в Европе звёздного каталога), содержащий угловые координаты звёзд (склонение и прямое восхождение) и звёздные величины, характеризующие их блеск.

Для отображения на экране имитатора звёздного неба звёзд, соответствующих текущему угловому положению звёздного датчика и входящих в его поле зрения, координаты звёзд из звёздного каталога должны быть переведены в систему координат звёздного датчика с помощью матрицы преобразования  $M$ , получаемой на основе параметров, найденных вследствие интегрирования кинематических уравнений космического аппарата:

$$\omega = 2\bar{Q} \otimes \frac{dQ}{dt}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — вектор угловой скорости КА;  $Q = [q_0, q_1, q_2, q_3]$  — кватернион, описывающий ориентацию КА;  $\bar{Q}$  — кватернион, обратный к  $Q$ ;  $\otimes$  — операция умножения кватернионов.

Матрица преобразования имеет вид

$$M = \begin{pmatrix} 1 - 2q_2^2 - 2q_3^2 & 2q_1q_2 - 2q_3q_0 & 2q_1q_3 + 2q_2q_0 & 0 \\ 2q_1q_2 + 2q_3q_0 & 1 - 2q_1^2 - 2q_3^2 & 2q_2q_3 - 2q_1q_0 & 0 \\ 2q_1q_3 - 2q_2q_0 & 2q_2q_3 + 2q_1q_0 & 1 - 2q_1^2 - 2q_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Для графического представления звёздного неба на основе найденных координат звёзд в системе координат звёздного датчика используется графическая библиотека OpenGL, содержащая все необходимые функции для воспроизведения высококачественных цветных изображений.

Как известно, в реальных условиях на формирование изображения звёздного датчика влияют шумы, обусловленные работой детектора, а также качество изготовления оптической системы и возможность засветки матрицы Солнцем и другими источниками света.

В случае стэнда основным источником искажения являются аберрации оптической системы, а именно дисторсия. В связи с этим проводится калибровка стэнда. Для этого на мониторе имитатора выводится несколько калибровочных изображений, представляющих собой сетку, в узлах которой находятся калибровочные точки. Далее полученные изображения обрабатываются, что позволяет определить набор данных о соответствии моделируемых и реальных координат объектов и разработать калибровочную функцию.

Программное обеспечение прототипа звёздного датчика представляет собой совокупность алгоритмов предварительной обработки изображения, получаемого с помощью имитатора звёздного неба, алгоритмов распознавания звёзд и определения углового положения звёздного датчика.

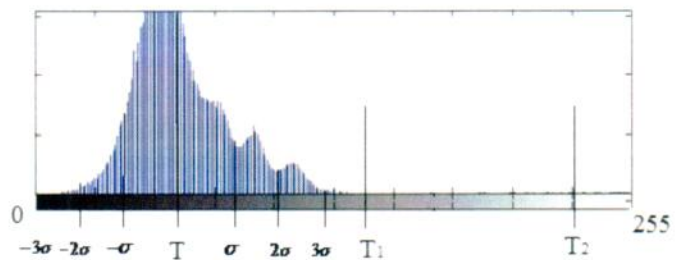


Рис. 2. Пороговые значения бинаризации

После получения изображения звёздного неба производится его бинаризация, которая заключается в обработке изображения с помощью пороговых значений бинаризации, в результате чего на изображении выделяются только контуры и очертания объектов, и исключается излишняя информация. Пороговые значения бинаризации определяются на основе анализа всего изображения, а именно анализа среднего значения интенсивности пикселей  $F_{cp}$  и среднеквадратического отклонения интенсивности пикселей  $\sigma$  по всему изображению. Так как на изображении звёздного неба преобладает чёрный цвет, среднее значение интенсивности пикселей по всему изображению будет близко к чёрному цвету, тогда нижнее пороговое значение  $T_1$  представляет собой случайную величину, лежащую в интервале  $(F_{cp} - 3\sigma, F_{cp} + 3\sigma)$  (рис. 2). Очевидно, что в качестве верхнего порога  $T_2$  принимается значение, близкое к максимальной интенсивности (см. рис. 2).

После бинаризации изображения применяется фильтрация для устранения шумов и дефектов изображения. Для этого производится обход изображения квадратным окном фильтра. Если в текущем положении окна количество ненулевых пикселей больше половины пикселей, входящих в окно, то центральному элементу окна фильтра присваивается единица, в противном случае — ноль.

Далее псевдозвёзды локализируются — выделяются связанные области путём обхода изображения специальной восьмисвязной маской. После этого определяются центры псевдозвёзд (координаты их центров).

Полученные координаты псевдозвёзд в кадре звёздного датчика используются для проведения распознавания звёзд, которое заключается в сопоставлении псевдозвёзд в кадре со звёздами в звёздном каталоге. Как правило, распознавание производится по каким-либо конфигурациям псевдозвёзд, в данном случае для распознавания была использована тройка псевдозвёзд, которая строится на основе одной псевдозвезды и двух её ближайших соседей (рис. 3).

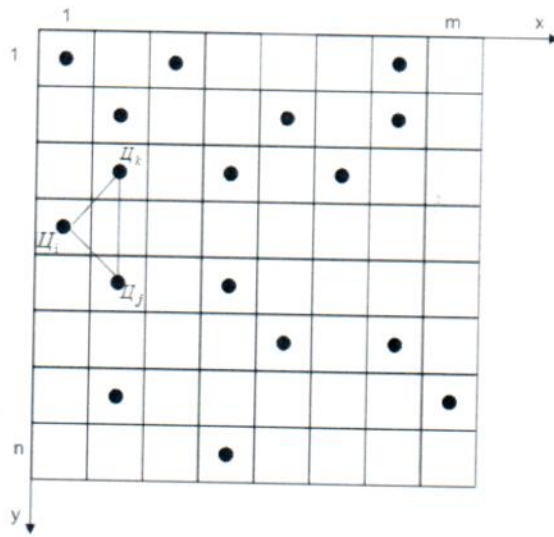


Рис. 3. Построение тройки псевдозвёзд



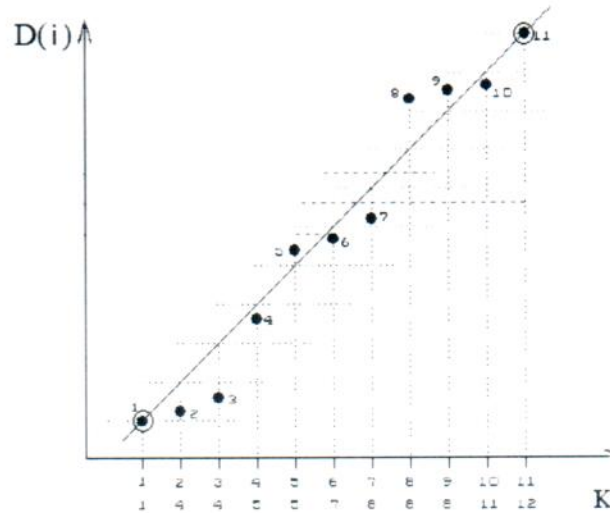


Рис. 4. Зависимость между элементами звёздного каталога и их положениями

В качестве параметров, характеризующих полученную тройку псевдозвёзд, используются угловые расстояния  $Q_{i-j}$ ,  $Q_{i-k}$ ,  $Q_{j-k}$  между парами звёзд в тройке. Полученные угловые расстояния сопоставляются со звёздным каталогом, который предварительно преобразуется в звёздный каталог угловых расстояний.

Для распознавания звёзд существует множество алгоритмов. В данном случае был использован алгоритм распознавания звёзд К-вектор [Mortari, 2000], который прошёл успешную проверку на космических аппаратах [Solaiarran et al., 2001] и имеет более высокое быстродействие по сравнению с традиционными методами поиска, например, методами бинарного поиска.

В соответствии с данным алгоритмом определяется зависимость между значением элемента звёздного каталога и его положением (рис. 4) [Mortari, 2000], которая позволяет среди всех элементов звёздного каталога угловых расстояний найти с некоторой точностью  $\xi$  такой диапазон элементов  $[\theta - \xi, \theta + \xi]$ , внутри которого лежит искомое значение расчётного углового расстояния  $\theta$  между псевдозвёздами.

В результате проведения распознавания становятся известны координаты звёзд в кадре звёздного датчика. Для определения его ориентации в инерциальной системе координат использовано соотношение, связывающее координаты трёх звёзд в кадре и соответствующие им координаты в звёздном каталоге. Для этого предварительно производится составление каталога инерциальных координат звёзд на основе звёздного каталога их угловых координат.

Для оценки ориентации, полученной с помощью программно-математического обеспечения звёздного датчика, разработано программное обеспечение стенда, которое позволяет визуализировать текущую ориентацию осей звёздного датчика относительно инерциальной системы координат и сравнивать расчётную ориентацию звёздного датчика с его исходной ориентацией, полученной в результате интегрирования уравнений кинематики космического аппарата.

### 3. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА СТЕНДЕ

В ходе испытаний стенда проведено тестирование программно-математического обеспечения звёздного датчика.

На начальном этапе в программном обеспечении стенда запускается модель движения КА и текущие данные о его ориентации отправляются в имитатор звёздного неба, где формируется кадр изображения участка звёздного неба.

Далее, по команде, прототип звёздного датчика производит съёмку звёздного неба, кадр передаётся в программное обеспечение звёздного датчика и определяется его ориентация. Полученная ориентация звёздного датчика визуализируется на ПК2 с помощью программного обеспечения стенда (рис. 5). Также в программном обеспечении стенда полученная с помощью звёздного датчика ориентация и исходная ориентация, задаваемая динамикой космического аппарата, выводится в текстовом окне в виде матрицы направляющих косинусов (см. рис. 5).

В результате сравнения полученной и истинной ориентации звёздного датчика установлено, что точность определения ориентации оптической оси звёздного датчика составила 18,5673 угл. с, точность определения угла поворота вокруг оптической оси — 21,4973 угл. с.

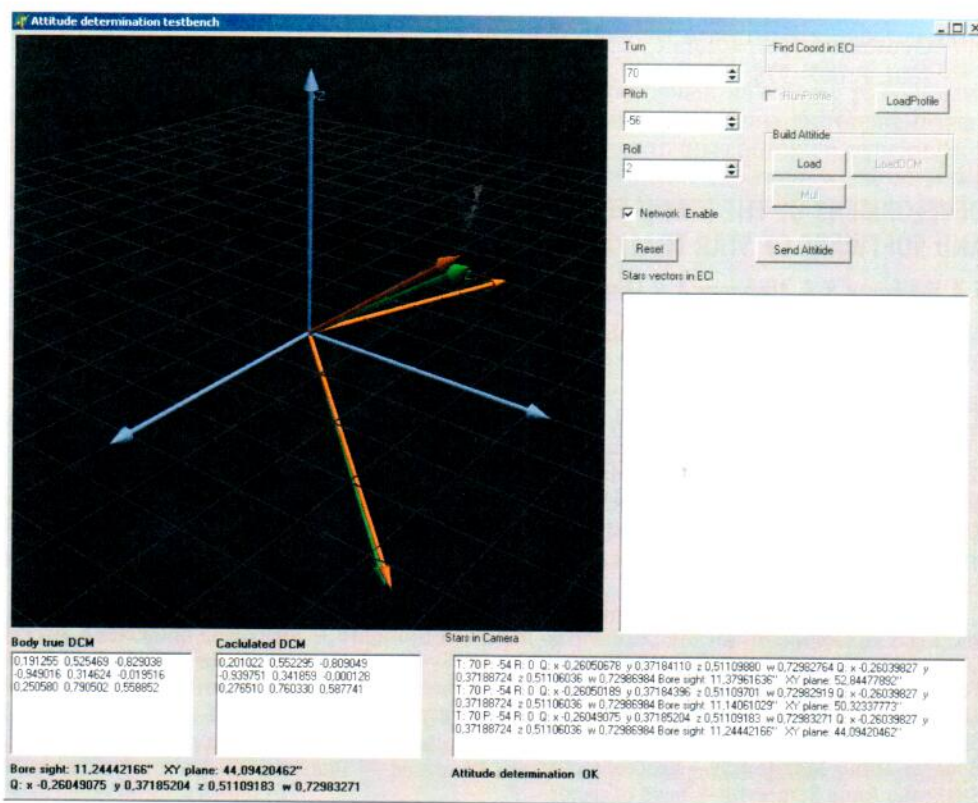


Рис. 5. Программное обеспечение стенда

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье приведены основные результаты по разработке лабораторного стенда для проведения тестирования программно-математического обеспечения звёздного датчика. Разработано программное обеспечение моделирования динамического изменения звёздного неба, происходящего в процессе движения космического аппарата. Разработано программное обеспечение для визуализации текущего углового положения звёздного датчика и анализа полученных результатов. Проведены испытания с помощью стенда, которые позволили оценить качество работы программно-математического обеспечения звёздного датчика, определить и выявить его погрешности.

Кроме того, необходимо отметить, что разработанный лабораторный стенд позволяет демонстрировать работу звёздного датчика, что даёт основание для его использования в качестве методической базы для обучения студентов космических специальностей.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Mortari, 2000] *Mortari D.* K-vector range searching techniques // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2000. N. 105. P. 449–464.
- [Solaiappan et al., 2001] *Solaiappan A., Pandiyan R., Ramachandran M., Vighhnesam N.* Attitude Determination Using an Experimental Fast Recovery Star Sensor (FRSS) for a Geostationary Spacecraft // *Materials 2<sup>nd</sup> Intern. Astronautical Congress*. Bangalore. 2001. P. 667–778.

## DEVELOPMENT OF THE STAND FOR TESTING THE MATHEMATICAL SUPPORT AND SOFTWARE OF STAR TRACKER

*S. A. Yelubayev, K. A. Alipbayev, A. V. Shamro, T. M. Bopayev, A. S. Sukhenko, D. L. Mikhailenko*

Affiliated limited liability company (ALLC) Institute of space technique and technologies (ISTT), Almaty, Republic of Kazakhstan

The star tracker is the high technology and high-precision device for determination of spacecraft angular position. In recent years it became an integral part of the spacecraft attitude determination and control system. Mathematical support and software is one of the most science intensive parts of the star tracker for testing and verification of which it is necessary to develop various testing equipment. In this article, the development of the stand for the testing of the star tracker's mathematical support and software on determination of its attitude is considered.

*Keywords:* star tracker, stand, mathematical support and software.

**Yelubayev** Suleimen Aktleuovich — head of laboratory  
**Alipbayev** Kuanysh Aryngozhaeyevich — deputy manager of laboratory, PhD  
**Shamro** Alexandr Valentinovich — head of the sector  
**Bopayev** Timur Maratovich — head of sector  
**Sukhenko** Anna Sergeevna — head of sector  
**Mikhailenko** Darya Leontyevna — researcher