

Лабораторный стенд для тестирования программно-математического обеспечения звездного датчика

В статье рассмотрены задачи тестирования и отработки программно-математического обеспечения звездного датчика, дано описание программного обеспечения для визуализации текущего углового положения звездного датчика и анализа полученных результатов. Приведены методы проведения тестирования, а также результаты разработки лабораторного стенда для тестирования программно-математического обеспечения звездного датчика.

Бұл мақалада жұлдыз датчигінің бағдарламалық-математикалық қамтамасыз етуін өңдеу мен тестілеу мәселелері қарастырылған, жұлдыз датчигінің ағымдағы бұрыштық қалпын визуализациялауға арналған бағдарламалық қамтамасыз етуге және алынған нәтижелердің талдауына сипаттама берілген. Тестілеуді жүргізу әдістері, сонымен қатар жұлдыз датчигінің бағдарламалық-математикалық қамтамасыз етуін тестілеуге арналған зертханалық стендті жасау нәтижелері келтірілген.

In this article the tasks of testing and processing of mathematical support and software of star tracker are considered, the description of software for visualization of star tracker current angular position and the analysis of obtained results are given. Methods of tests conduction, also results of laboratory bench development for star tracker mathematical support and software testing are represented.

С.А. ЕЛУБАЕВ, К.А. АЛИПБАЕВ,

А.В. ШАМРО, Т.М. БОПЕЕВ,

А.С. СУХЕНКО, Д.Л. МИХАЙЛЕНКО

ДТОО «Институт космической техники и технологий»,

г. Алматы

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

На заключительной стадии разработки комплектующих космического аппарата перед разработчиками встает 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 путем создания различного испытательного оборудования, стендов или имитаторов, которые

позволяют воспроизводить условия космического пространства в наземных условиях.

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

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

При разработке структуры стенда руководствовались следующими требованиями:

- разрабатываемый стенд должен обеспечивать отладку бортового программного обеспечения звездного датчика по определению его текущего углового положения;
- имитатор звездного неба должен обеспечивать отображение на экране монитора фрагмент звездного неба, соответствующего текущему положению космического аппарата на орбите и положению оптической оси звездного датчика;
- монитор имитатора звездного неба должен иметь разрешение 3840x2160;

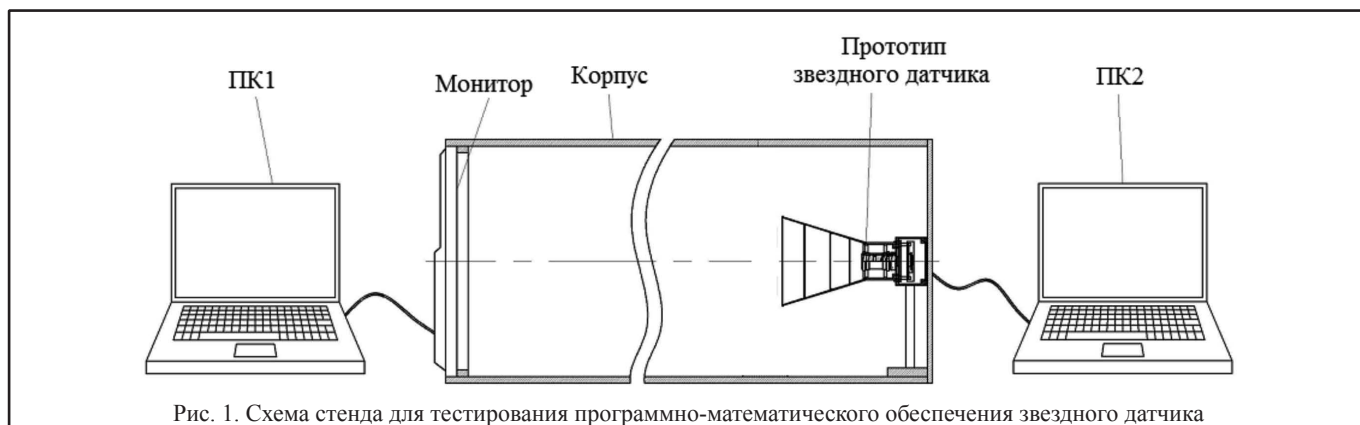


Рис. 1. Схема стенда для тестирования программно-математического обеспечения звездного датчика

– корпус стенда должен обеспечивать размещение и надежную фиксацию монитора имитатора звездного неба и прототипа звездного датчика, а также их защиту от внешних источников света;

– прототип звездного датчика должен производить определение своей ориентации на основе снимка звездного неба. Для стенда в качестве прототипа звездного датчика использована веб-камера, программно-математическое обеспечение стенда запускается на ПК2.

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

Программное обеспечение имитатора звездного неба должно обеспечивать отображение на экране монитора фрагмент звездного неба, который мог быть получен с помощью звездного датчика, установленного на борту космического аппарата. Для отображения звездного неба на экране монитора используется звездный каталог Hipparcos, содержащий угловые координаты звезд (склонение и прямое восхождение) и их звездные величины, характеризующие их блеск.

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

$$\omega = 2\bar{Q} \otimes \dot{Q} \quad (1)$$

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

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

где M — матрица преобразования.

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

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

В случае стенда, основным источником искажения являются аберрации оптической системы, а именно дисторсия.

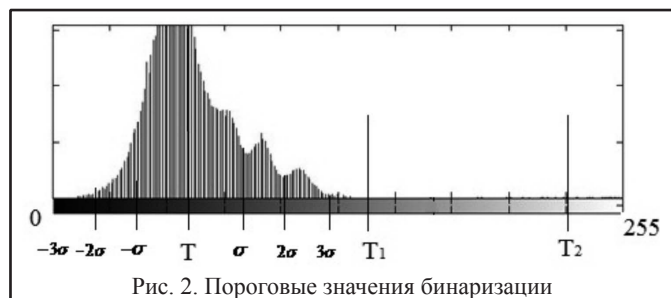


Рис. 2. Пороговые значения бинаризации

В связи с этим проводится калибровка стенда. Для этого на мониторе имитатора выводится несколько калибровочных изображений, представляющих собой сетку, в узлах которой находятся калибровочные точки. Далее производится обработка полученных изображений, которая позволяет определить набор данных о соответствии полученных и реальных координат калибровочных точек и разработать калибровочную функцию.

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

После получения изображения звездного 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, при этом излишняя информация исключается. Пороговые значения бинаризации определяются на основе анализа всего изображения, а именно анализа среднего значения интенсивности пикселей F_{cp} и среднеквадратического отклонения интенсивности пикселей σ по всему изображению. Так как на изображении звездного неба преобладает черный цвет, то среднее значение интенсивности пикселей по всему изображению будет близко к черному цвету, тогда нижнее пороговое значение T_1 представляет собой случайную величину, лежащую в интервале $(F_{cp} - 3\sigma, F_{cp} + 3\sigma)$ (рис. 2). Здесь очевидно, что в качестве верхнего порога T_2 принимается значение, близкое к максимальной интенсивности.

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 производится локализация псевдозвезд, которая заключается в выделении связанных областей путем обхода изображения специальной восьмисвязной маской. После этого производится определение центроидов псевдозвезд (координаты их центров).

Полученные координаты псевдозвезд в кадре звездного датчика используются для проведения распознавания звезд, которое заключается в сопоставлении псевдозвезд в кадре со звездами в звездном каталоге. Как правило, распознавание производится по каким-либо конфигурациям псевдозвезд, в данном случае для распознавания была использована тройка псевдозвезд, которая строится на основе одной псевдозвезды и двух ее ближайших соседей (см. рис. 3).

В качестве параметров, характеризующих полученную тройку псевдозвезд, используются угловые расстояния $\theta_{i-j}, \theta_{i-k}, \theta_{j-k}$ между парами звезд в тройке. Полученные угловые расстояния сопоставляются с звездным каталогом, который предварительно преобразуется в звездный каталог угловых расстояний.

Для распознавания звезд существует множество алгоритмов. В данном случае был использован алгоритм распознавания звезд К-вектор [1], который прошел успешную проверку на космических аппаратах [2] и имеет намного лучшее быстродействие по сравнению с традиционными методами поиска, например методами бинарного поиска.

В соответствии с данным алгоритмом определяется зависимость между значением элемента звездного каталога и его положением (рис. 4) [1], которая позволяет среди всех элементов звездного каталога угловых расстояний найти с некоторой точностью ζ такой диапазон элементов $[\theta - 2\zeta, \theta + 2\zeta]$, внутри

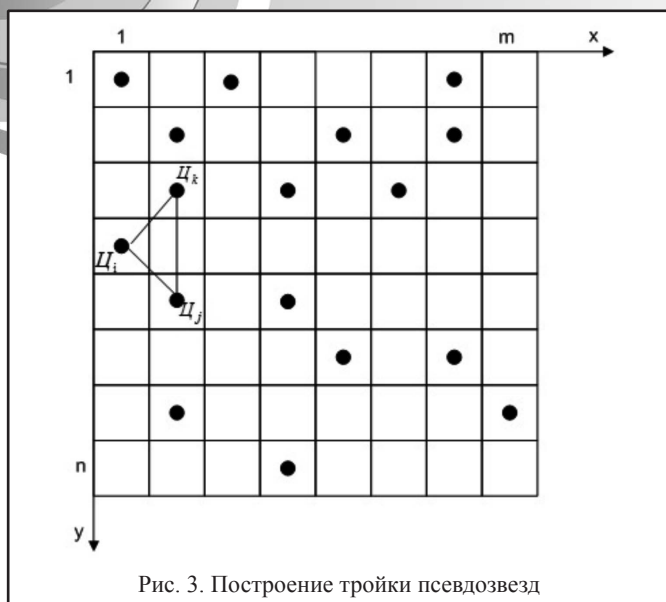


Рис. 3. Построение тройки псевдозвезд

которого лежит искомое значение расчетного углового расстояния θ между псевдозвездами.

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

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

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

На начальном этапе в программном обеспечении стенда запускается модель движения КА и текущие данные о его ориентации отправляются в имитатор звездного неба, где осуществляется формирование кадра изображения участка звездного неба.

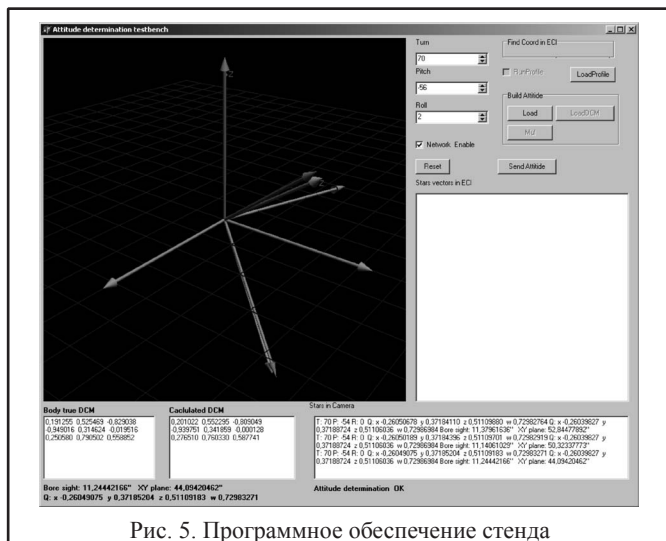


Рис. 5. Программное обеспечение стенда

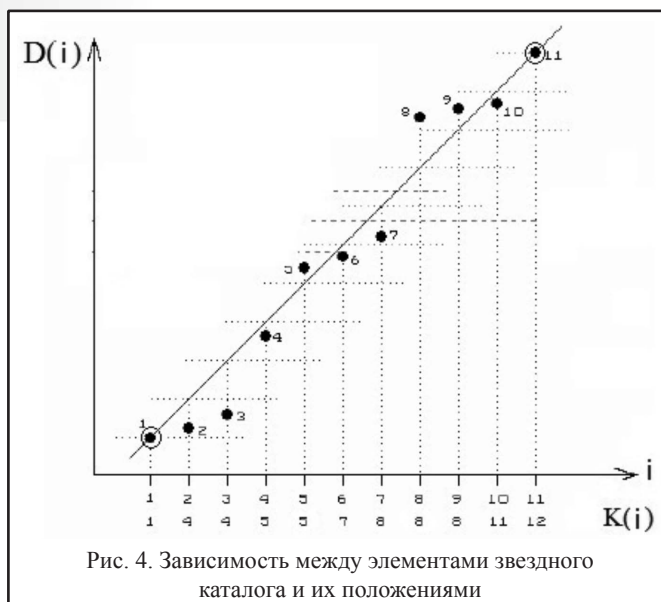


Рис. 4. Зависимость между элементами звездного каталога и их положениями

Далее по команде прототип звездного датчика производит съемку звездного неба, которое передается в программное обеспечение звездного датчика и производится определение его ориентации. Полученная ориентация звездного датчика визуализируется на ПК2 с помощью программного обеспечения стенда. Также в программном обеспечении стенда полученная с помощью звездного датчика ориентация и исходная ориентация, задаваемая динамикой космического аппарата, выводится в текстовом окне в виде матрицы направляющих косинусов (рис. 5).

В результате сравнения полученной и истинной ориентации звездного датчика определено, что средняя точность определения ориентации оптической оси звездного датчика и средняя точность определения угла поворота вокруг оптической оси составляет 0,5 градуса. Наилучшая точность, полученная в ходе испытаний, составляет 18, 5673 уг.сек для ориентации оптической оси, 21, 4973 уг.сек — для угла поворота вокруг оптической оси.

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

Кроме того, необходимо отметить, что разработанный лабораторный стенд позволяет демонстрировать работу звездного датчика, что дает основание по его использованию в качестве методической базы для обучения студентов космических специальностей.

Литература:

1. Mortari D. K-vector range searching techniques // Adv. Astronaut. Sci. — 2000. — №105. — P. 449–464
2. Solaiappan A.; Pandiyan R.; Ramachandran M.; Vighnesam N. Attitude determination using an experimental fast recovery star sensor (FRSS) for a geostationary spacecraft // Materials of 2nd International Astronautical Congress. — Bangalore, 2001. — P. 667-778.