

УДК 62-91; 51-37; 519.688; 004.932.2

В. Е. Набивач¹, В. Н. Опанасенко², О. В. Семенив¹, В. А. Яценко¹

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Національного космічного агентства України, Київ

² Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова Національної академії наук України, Київ

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

Описано алгоритм визначення орієнтації космічного апарату за допомогою зоряного датчика. Представлено систему рівнянь, що використовується в алгоритмі визначення орієнтації космічного апарату. Запропоновано алгоритм ідентифікації сегментів зоряного неба, що ґрунтується на використанні навігаційного каталогу та найбільш інформативних ознак. Обговорюються перспективи реалізації алгоритму на програмованій логіці.

ВВЕДЕНИЕ

Звездные датчики (ЗД) находят все большее применение для высокоточного определения ориентации космических аппаратов (КА) [11, 12, 16]. Современные системы ориентации и навигации с использованием ЗД позволяют проводить трехосную ориентацию КА на основе алгоритмов распознавания сегментов звездного неба (АРСЗН) [9–12, 14, 16, 17, 19, 23, 25]. На сегодняшний день в мире насчитывается более десяти производителей, которые выпускают около 40 моделей звездных датчиков различных типов и назначения. Например, в России разработкой и производством ЗД занимаются в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН), ОКБ «Марс», НПО «Геофизика—Космос» и НПО «Лептон» [3]. Разработка ЗД активно ведется и на западных предприятиях [3]: SODERN (Франция), «Ball Aerospace» (США), «Galileo Avionica» (Италия), «Drapac Laboratory» (США), «Goodrich» (США), «Jena-Ortronik» (Германия), TERMA (международная корпорация) и др. (см. http://www.sodern.com/site/FO/scripts/siteFO_contenu.php?mode=&noeu_id=56&lang=EN; <http://www.ballaerospace.com/page.jsp?page=104>).

Приборы серии «БОКЗ» (блок определения координат звезд, ИКИ РАН) достаточно удачно

эксплуатируются в Российской Федерации. Они предназначены для высокоточного определения в реальном времени параметров трехосной ориентации по изображениям сегментов звездного неба. Основными элементами приборов БОКЗ является цифровая телевизионная камера на ПЗС-матрице, мощный сигнальный процессор и источник вторичного электропитания. Прибор БОКЗ-М используется в качестве астрокорректора гироскопических датчиков угловых скоростей, работающих в реальном времени. Поэтому требования по точности к ЗД предъявляются все более жесткие. Так, для координатной привязки элемента съемочной системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого пространственного разрешения требуется точность определения ориентации порядка долей секунды дуги [1].

Прибор БОКЗ-М имеет точность углового позиционирования оси Z — 1.5 сд (секунд дуги) при измерении параметров вращения вокруг осей X , Y . При измерении параметров вращения вокруг оси Z точность определения угла составляет 15 сд.

Для повышения точности определения ориентации в ИКИ РАН предлагается использовать синхронно работающие приборы. Были проведены серии экспериментов по совместной работе двух ЗД с минутным и трехсекундным интервалом выдачи данных. На основе этих экспериментов в отделе оптико-физических исследований ИКИ РАН [1] реализован алгоритм рав-

ноточного определения трехосной ориентации до 1.5 сд по каждой из координат.

В настоящее время НПО «Геофизика-Космос» ведет разработку нескольких типов современных ЗД для различных КА [6]. Прибор 329К определяет углы трехосной ориентации приборной системы координат, которая жестко связана с корпусом прибора, относительно геоцентрической системы координат. Разработка, начатая в 2003 г., в настоящее время находится в завершающей фазе наземной экспериментальной отработки. Целью разработки является создание промышленного образца современного российского звездного прибора с характеристиками на уровне мировых и гарантированным ресурсом эксплуатации не менее 100 000 ч.

При этом предусматривается создание:

- собственно образца, который соответствует определенным техническим требованиям и прошел цикл экспериментальной отработки;
- комплекта конструкторской и технологической документации, выпущенной согласно действующим нормативным документам;
- необходимого для производства набора технологического и испытательного оборудования.

Словосочетание «мировой уровень» предусматривает создание прибора, уровень характеристик которого соответствует зарубежным образцам, которые выпускаются, пользовались и пользуются спросом у потребителей после 2000 г. К таким приборам были отнесены ЗД фирмы Sodern SED-16 (год летной квалификации 2002) и его модификация SED-26 (год летной квалификации 2005).

По основным характеристикам прибор 329К соответствует характеристикам ЗД SED-16/26. Конструктивная и электрическая схемы приборов типовые. Техническими особенностями прибора 329К являются

- проведение с помощью специального оптического канала полетной калибровки измерительного тракта, что обеспечивает высокую точность измерений в связанной с корпусом системы координат;
- использование при программной обработке информации так называемого «метода окон», который позволяет повысить помехозащищенность прибора;

- паспортизация системы внутренних параметров ЗД и их учет во время полета.

Дальнейшей модификацией прибора 329К является прибор 345К.

Приборы SED-16/26 — это полностью автономные трехосные универсальные приборы для определения ориентации по изображениям звезд. Это ЗД, которые предназначены для управления ориентацией КА в космическом пространстве на низких, средних и геостационарных орбитах или в глубоком космосе.

Основные черты приборов SED-16/26:

- значительная унификация,
- высокая надежность в условиях космической среды, в частности под действием излучения,
- автоматическое получение ориентации по трем осям при инициализации прибора,
- автономный режим, который требует минимального управления со стороны системы управления пространственным положением АОС,
- предоставление с высокой (до 10 Гц) частотой данных о трехосной ориентации,
- интеграции компактного оборудования в единый блок,
- возможности работы с высокими скоростями вращения (до 10 град/с) и угловыми ускорениями (до 10 град/с²) при частоте выдачи данных 10 Гц.

Фирма «Sodern» предлагает различные, в зависимости от нужного угла защитного экрана, интерфейса вывода данных, и других требований, варианты ЗД SED-16/26. Оптическое и электрическое оборудование наземного обеспечения также доступно потребителям. Прибор SED-26 является ITAR-free версией ЗД SED-16 (international traffic in arms regulations), что упрощает его использование в любой миссии. SED-26 сочетает в себе преимущества уже проверенных в полете конструктивных решений с современными техническими средствами их реализации.

Сейчас в космическом приборостроении наблюдается тенденция к комплексированию функционально близких приборов. Уже упоминалось, что в ИКИ РАН создан звездный координатор, сочетающий ЗД ориентации и гироскоп. Эти два прибора удачно дополняют друг друга, увеличивая надежность выполнения целевого задания. В настоящее время в ИКИ РАН раз-

рабатывается интегрированный прибор, который сочетает ЗД ориентации, гироскоп средней точности и устройство спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS. Предполагается, что этот прибор будет полностью удовлетворять требованиям КА ДЗЗ по точности ориентации.

Научные исследования в области космической техники и практические разработки приборов проводятся с использованием современных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Технология ПЛИС позволяет реализовать в кристалле практически любой проект цифрового прибора [21].

Важное место в создании перспективных систем ориентации в космическом пространстве отводится разработке быстродействующих алгоритмов определения ориентации КА с использованием методов идентификации сегментов звездного неба. При этом учитывается возможность засветки оптической части ЗД.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

Функциональная структура ЗД (рисунок) состоит из следующих компонентов:

- блок визуализации звезд на основе ПЗС-матрицы (регистрации звезд, определения засветки, формирования окон одиночных звезд, построения изображения);
- блок навигационного каталога звезд с информативными признаками;
- блок выдачи направления на звезды относительно приборной системы координат (ПСК) (оценки информативных признаков, классификации, определения ориентации ПСК);
- блок определения ориентации ПСК относительно инерциальной системы координат (ИСК).

Предполагается, что алгоритм определения ориентации звездного датчика (АОЗД) выдает направление на звезды с некоторой статистической погрешностью, а навигационный каталог звезд — направления на звезды без погрешности относительно ИСК. Алгоритм АОЗД по измеренным направлениям на звезды и данным из каталога определяет ориентацию ПСК относительно ИСК. Предполагается, что АОЗД может быть реализован на основе ПЛИС.

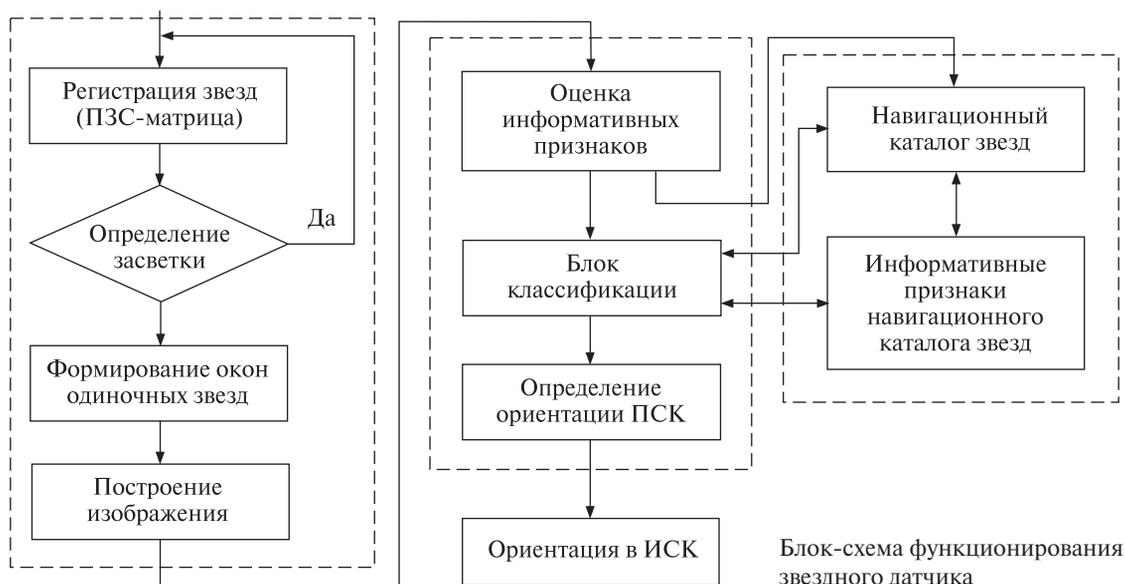
Алгоритм ориентации звездного датчика основывается на следующей модели. Вводим две правые системы координат $Ox_1x_2x_3$ и $Oy_1y_2y_3$. Трехгранник $x_1x_2x_3$ является ИСК, а $y_1y_2y_3$ жестко связан с ЗД и является ПСК. Пусть в поле зрения ЗД находится N звезд, \mathbf{r}_i — единичный вектор, задающий точное направление на i -ю звезду, а \mathbf{q}_i — измеренный ЗД единичный вектор, направленный на ту же звезду.

Тогда решение задачи определения ориентации КА сводится к численному решению системы линейных уравнений

$$\mathbf{Z}\boldsymbol{\rho}=\mathbf{b}, \quad (1)$$

где $\mathbf{Z}=\sum_{i=1}^N\frac{1}{\sigma_i^2}r_v^{(i)}r_v^{(i)}$, $\mathbf{b}=\sum_{i=1}^N\frac{1}{\sigma_i^2}r_v^{(i)}\hat{q}_v^{(i)}$, $\boldsymbol{\rho}=2\mathbf{v}$, $\mathbf{v}=(v_1v_2v_3)^T$ — параметры Родрига для кватерниона.

Данный алгоритм расчета ориентации предполагает использование по крайней мере двух различных звезд. Для рассчитанной ориентации можно определить вероятность попадания решения в нужную окрестность реальной ориентации. Если все звезды имеют одинаковую дисперсию погрешности измерения, то погрешность расчета ориентации распадается на две независимые друг от друга части: погрешность самого ЗД и константы, значение которой зависит от взаимного положения визируемых звезд. Из уравнения (1) следует, что если к звездам, с помощью которых ведется процесс ориентации, добавить группу хотя бы с одной парой звезд, то собственные числа матрицы $-\mathbf{Z}$ увеличиваются. Это приводит к уменьшению следа матрицы $-\mathbf{Z}$ и уменьшению погрешности ориентации. Поэтому увеличить точность ориентации можно не только за счет уменьшения погрешности ЗД, но и за счет увеличения числа звезд, используемых при расчете. При этом погрешность ориентации, рассчитанной по k кадрам при одних и тех же \mathbf{L} звезд, равна погрешности, рассчитанной по одному кадру тех же \mathbf{L} звезд при уменьшении дисперсии измерений в k раз. Проведен предварительный анализ шумовых факторов, влияющих на работу ЗД (световые помехи, естественные источники излучения, изменение яркости источника излучения).



АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ СЕГМЕНТА ЗВЕЗДНОГО НЕБА

В большинстве имеющихся алгоритмах распознавания сегмента звездного неба (АРСЗН) используются прямые методы поиска [7, 9, 10, 13–15, 17, 18, 22–26], в которых сравниваются наблюдаемые данные с каталогом звезд. Большинство этих алгоритмов не обладают достаточным быстродействием, что затрудняет их практическое использование.

Идентификация сегментов звездного неба требует высокого быстродействия реализации программных процедур, экономного использования оперативной памяти процессора и незначительного объема информации навигационного каталога. Для создания эффективного алгоритма необходимо использовать наиболее информативные признаки данных наблюдений [2], а для реализации АРСЗН целесообразно построить навигационный каталог на основе алгоритмов распознавания и выборки.

Для идентификации звезд использовался звездный каталог SKYMAP Master Star Catalog, созданный в NASA's Goddard Space Flight Center для поддержки приборов звездной ориентации и их программного обеспечения [20]. Главная версия каталога содержит информацию о звездных объектах (300000 звезд), которые имеют звездную величину более 9^m .

Для построения модели классификации предложено использование метода опорных векторов [2]. Процесс построения АРСЗН состоит в последовательном выполнении процедур: создание навигационного каталога звезд, сегментация изображения; создание обучающей последовательности сегментов и их инвариантов, конвертация изображений звезд в матрицу чисел, оценивание опорных векторов и вычисление сферических координат ИСК звездного неба для каждого сегмента, тестирование и валидация алгоритма.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАСВЕТКИ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

Важную роль в первичной обработке данных ЗД занимает алгоритм определения засветки объектива звездного датчика (АОЗД) посторонними космическими объектами (планеты, астероиды, метеориты, Солнце и др.). Наличие засветки ухудшает работу АРСЗН и АОЗД.

Входные изображения можно описать на плоскости путем разбивки на элементы регулярной решетки и присвоения каждому элементу определенного атрибута.

Таким образом, изображение можно представить в виде матрицы C , компоненты которой $C[l, j]$ характеризуют интенсивность яркости, где l — номер столбца, j — номер строки. Предположим, что каждая из звезд на изображении

отвечает определенному количеству элементов h_l в столбце и h_j — в строке матрицы C , которое зависит от звездной величины q . При этом несколько элементов $C[l', j']$ могут принимать максимальное значение, где $l' = 1, \dots, h_l^q$, $j' = 1, \dots, h_j^q$, $h_l^q < h_l$, $h_j^q < h_j$, h_l^q — максимальное число элементов в столбце, h_j^q — максимальное количество элементов в строке. Далее определим максимальное число n элементов матрицы C путем подсчета числа h_l^q и h_j^q элементов $C[l', j']$ для звезды с максимальным значением q . Тогда n будет равно

$$\begin{cases} n = h_l^q, & \text{если } h_l^q > h_j^q; \\ n = h_j^q, & \text{если } h_l^q \leq h_j^q. \end{cases}$$

Для реализации АОЗЗД предлагается использовать «аналитическое окно» размером $W[n+1, n+1]$ с использованием бинарных деревьев.

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Одним из методов цифровой обработки изображений, применяемых для устранения дефектов изображения, обусловленных помехами и шумами, является медианная фильтрация [4, 5, 8]. Медианные фильтры используются для сглаживания информации в случаях, когда шумовые характеристики неизвестны. Так, для двумерного окна, медианный фильтр из множества векторов, характеризующих яркость для полутонового изображения или цвет для цветового, выбирает вектор со средним значением, которое затем присваивается центральному пикселю окна.

Рассмотрим реализацию медианного фильтра в элементном базисе ПЛИС типа FPGA фирмы «Xilinx» [21], используя при этом последовательную, последовательно-параллельную и параллельную вычислительные модели. Пусть для входного множества двоичных векторов $X = \{x_i\}$ ($i = 1, \dots, n$) необходимо определить медиану x_{med} . Алгоритм определения медианы в этом случае представляет собой сортировку данных с последующим выбором кода, имеющим номер $(n-1)/2$ из отсортированной последовательности, нумерация которой начинается с нуля. Формируется квадратная матрица $Y = \|y_{ij}\|$, ($i, j = 1, \dots, n$), где

$y_{ij} \in \{0, 1\}$ — элемент матрицы, который определяется по правилу:

$$\begin{cases} y_{ij} = 1, & \text{если } x_i \geq x_j, \forall j = i + z, z = 1, \dots, n - i; \\ y_{ij} = 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Элементы y_{ij} главной диагонали матрицы ($i = j$) принимают нулевое значение. Необходимо определить значения элементов y_{ij} с индексами $i > j$, лежащих выше главной диагонали (количество этих элементов определяется величиной $(n^2 - n)/2$). Значения элементов y_{ij} , лежащих ниже главной диагонали, будут принимать следующие значения:

$$\begin{cases} \text{если } (\forall i > j) y_{ij} = 1, \text{ то } y_{ji} = 0; \\ \text{если } (\forall i > j) y_{ij} = 0, \text{ то } y_{ji} = 1. \end{cases}$$

Для каждой строки полученной матрицы $Y = \|y_{ij}\|$ вычисляется арифметическая сумма значений ее элементов $s_i = \sum_j y_{ij}$.

В зависимости от численного значения s_i , которое однозначно соответствует входному вектору x_i , получаем результат сортировки множества векторов X :

$$\begin{cases} \text{если } s_i = 0, \text{ то } x_i = \min\{X\}; \\ \text{если } s_i = (n-1), \text{ то } x_i = \max\{X\}; \\ \text{если } s_i = (n-1)/2, \text{ то } x_i = \text{med}\{X\}. \end{cases}$$

Предложенный алгоритм реализован различными способами в зависимости от количества одновременно формируемых элементов матрицы $Y = \|y_{ij}\|$. Результаты синтеза и реализации проектов в кристалле XCV50CS144-6 получены с использованием инструментальных средств FPGA Express и программ размещения и трассировки системы Xilinx Foundation Series.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ состояния проблемы построения перспективных образцов 3Д ориентации. Последнее поколение 3Д автономной астроориентации на основе ПЗС-матриц входит в большинство современных систем ориентации и навигации космических средств. Дальнейшее развитие 3Д направлено на использование чувствительных сенсоров с активными пикселями, которые значительно более радиационно-стойкие, энергосберегающие, дешевые и компактные. Кроме того, значительное внимание уделяется комплексированию функционально близких приборов и интегрированию ис-

точников первичной информации (например гироскопа и ЗД, двух или трех ЗД, приборов спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS).

Описан алгоритм определения ориентации ЗД с помощью звездного каталога. Предложен алгоритм идентификации сегмента звездного неба, основанный на навигационном каталоге и наиболее информативных признаках. На основе матричной вычислительной модели предложены алгоритмы и разработаны последовательная, параллельная и последовательно-параллельная структурные реализации фильтрации возможных шумов датчика с помощью операции сравнения на базе кристаллов ПЛИС.

1. *Аванесов Г. А., Красиков В. А., Никитин А. В.* Оценка точности прибора БОКЗ-М по результатам наземных и летных испытаний. Анализ синхронной работы двух приборов // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. — Таруса, 2008. — С. 44—45.
2. *Вапник В. Н., Червоненкис А. Я.* Теория распознавания образов. — М.: Наука, 1974. — 415 с.
3. *Дятлов С. А., Бессонов Р. В.* Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. — Таруса, 2008. — С. 11—31.
4. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений: В 2-х кн. — М.: Мир, 1982. — Кн. 1. — 312 с.
5. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений: В 2-х кн. — М.: Мир, 1982. — Кн. 2. — 792 с.
6. *Федосеев В. И., Герасимов С. А., Абакумов В. М., Исаков А. Н.* Новые звёздные приборы. // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. — Таруса, 2008. — С. 12—13.
7. *Accardo D., Rufino G.* Brightness independent star-up routine for star trackers // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. — 2002. — **38**(3). — P. 813—823.
8. *Astola J., Haavisto P., Neuvo Y.* Vector median filters // Proc. IEEE. — 1990. — **78**, N 4. — P. 678—689.
9. *Bardwell G.* On-board artificial neural network multi-star identification system for 3-axis attitude determination // Acta Astron. — 1995. — **35**. — P. 753—761.
10. *Cole C. L., Crassidis J. L.* Fast star-pattern recognition using planar triangles // J. Guid. Control and Dynam. — 2006. — **29**. — P. 64—71.
11. *Eisenman R., Liebe C. C., Joergensen J. L.* The new generation of autonomous star trackers // Proc. SPIE. — 1997. — **3221**. — P. 524—535.
12. *Fossum E. R., Bartman R. K., Eisenman A. R.* Application of the active pixel sensor concept to guidance and navigation // Proc. SPIE. — 1993. — **1949**. — P. 256—265.
13. *Guangjun Z., Wei X., Jiang J.* Full-sky autonomous star identification based on radial and cyclic features of star pattern // Image Vision Comput. — 2008. — **26**. — P. 891—897.
14. *Kolomenkin M., Pollak S., Shimshoni I., Lindenbaum M.* Geometric voting algorithm for star trackers // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. — 2008. — **44**. — P. 441—456.
15. *Lee H., Bang H.* Star pattern identification technique by modified grid algorithm // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. — 2007. — **43**. — P. 202—213.
16. *Liebe C. C.* Accuracy performance of star trackers—a tutorial // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. — 2002. — **38**(2). — P. 587—599.
17. *Lin T., Zhou J. L.* All-sky automated quaternary star pattern recognition // J. Astronaut. — 2000. — 21. — P. 82—85.
18. *Mortari D.* Search-less algorithm for star pattern recognition // J. Astronaut. Sci. — 1997. — **45**(2). — P. 179—194.
19. *Mortari D., Samaan M. A., Bruccoleri C.* The pyramid star identification technique // Navigation. — 2004. — **51**. — P. 171—183.
20. *Myers J. R., Sande C. B., Miller A. C., et al.* SKY2000 Catalog, Version 4 (Myers+2002) // SAO/NASA ADS Astronomy. <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?source=V/109>
21. *Palagin A. V., Opanasenko V. N., Sakharin V. G.* Features of digital devices design of modern PLD of the Xilinx incorporation // J. Automation and Inform. Sci. — 2001. — **33**, N 3. — P. 80—89.
22. *Padgett C., Kreutz-Delgado K., Udomkesmalee S.* Evaluation of star identification techniques // J. Guid. Control and Dynam. — 1997. — **20**(2). — P. 259—267.
23. *Rousseau G. L. A., Bostel J., Mazari B.* Star recognition algorithm for APS star tracker: Oriented triangles // IEEE Aerospace and Electron. Syst. Mag. — 2005. — **20**. — P. 27—31.
24. *Samaan M. A., Mortari D., Junkins J. L.* Nondimensional star identification for uncalibrated star cameras // J. Astronaut. Sci. — 2006. — **54**. — P. 95—111.
25. *Wang Z. L., Quan W.* An all-sky autonomous star map identification algorithm // IEEE Aerospace and Electron. Syst. Mag. — 2004. — **19**. — P. 10—14.
26. *Zhang G. J., Wei X. G., Jiang J.* Star map identification based on a modified triangle algorithm // ACTA Aeronaut. ET Astronaut. SINICA 2006. — **27**. — P. 1150—1154.

Надійшла до редакції 17.12.10

*V. E. Nabivach, V. N. Opanasenko,
O. V. Semeniv, V. O. Yatsenko*

AN ALGORITHM OF DETERMINATION FOR SPACECRAFT ORIENTATION WITH THE USE OF A STAR SENSOR

An algorithm for the spacecraft orientation determination using a star sensor is described. The equation system which is used in the spacecraft orientation algorithm is proposed. We describe an algorithm for star recognition which is based on the application of the navigation catalogue and on the most informative characteristics. Some prospects for the PLD-based algorithm realization are discussed.