

ПОВЫШЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЗВЕЗД ПУТЕМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА И МЭМС-ГИРОСКОПА

В.О. Князев, А.А. Поздняков

ОАО “НПП “Геофизика-Космос”, Москва, Российская Федерация
e-mail: 1102@geocos.ru

Предложен метод повышения вероятности распознавания фрагмента звездного неба при больших угловых скоростях космического аппарата. Метод состоит из двух частей: первая — определение угловой скорости средствами встроенных в звездный датчик микромеханических датчиков угловой скорости, выбор оптимального времени накопления сигналов и специально сформированного для текущей скорости звездного каталога. Вторая — слежение не только за визируемыми на фотоприемной матрице звездами, но и за теми звездами, которые уже вышли за пределы поля зрения. Слежение за такими звездами возможно путем интегрирования угловой скорости с МЭМС-гироскопов с последующим пересчетом координат на текущий момент времени.

Ключевые слова: звездный датчик, датчик угловой скорости, МЭМС, распознавание звезд, слежение, звездный каталог, алгоритм.

INCREASING THE PROBABILITY OF STAR IDENTIFICATION BY INTEGRATING A STAR TRACKER WITH A MEMS GYROSCOPE

V.O. Knyazev, A.A. Pozdnyakov

ОАО “NPP “Geofizika-Kosmos”, Moscow, Russian Federation
e-mail: 1102@geocos.ru

A method is proposed for increasing the probability of identification of a star-sky fragment with large angular rates of the spacecraft. The method includes two options: (1) determination of the angular rate by means of micromechanical sensors of angular rate embedded in the star tracker; selection of the optimal time of signal acquisition and the star catalogue specially formed for the current speed; (2) tracking the stars not only sighted at the photo-receiving matrix but also those gone beyond the field of vision. Tracking the motion of these stars is possible by integrating the angular rates from the MEMS gyroscopes with the following recalculation of coordinates for the current time moment.

Keywords: star tracker, angular rate sensor, MEMS, star identification, tracking, star catalogue, algorithm.

В современных звездных датчиках (ЗД) алгоритмы распознавания основаны на сравнении угловых расстояний между звездами, визируемыми на фотоприемной матрице (ФПМ), с угловыми расстояниями между звездами, указанными в приборном каталоге. Для уверенного распознавания звезд необходимым условием является достаточно малая погрешность определения углового расстояния между ними. Если эта погрешность больше некоторого значения (обычно $\sim 1 \dots 2$ пиксел ФПМ), то алгоритмы распознавания могут не найти соответствующие пары, а затем и группы визируемых звезд из приборного каталога или

провести неверное соответствие. Кроме того, при передаче в алгоритм распознавания не только координат звезд, но и светящихся “звездopodobных” объектов, высока вероятность совпадения углового расстояния звезда–помеха с парой звезд из приборного каталога. Алгоритмы распознавания могут отличаться друг от друга, однако всегда предполагают наличие минимального числа одновременно визируемых звезд (обычно 4–6).

При повышенных угловых скоростях вращения космического аппарата (КА) возникает “смаз” изображения звезд на ФПМ ЗД. “Смаз” сильно усложняет поиск изображения звезды, особенно при наличии дефектных элементов ФПМ и эффектов воздействия падающих протонов. Кроме того, ухудшается точность вычисления энергетического центра изображения. Распределение изображения звезд на ФПМ ЗД для различных значений угловой скорости вращения КА без учета шумов с ФПМ и с их учетом приведены на рис. 1. Эти распределения получены математическим моделированием с исходными данными в виде функции рассеивания точки (ФРТ) номинального объектива ЗД для времени накопления сигналов 200 мс.

Согласно рис. 1, форма изображения звезды сильно деформирована, тем более в условиях наличия шумов с ФПМ. Похожие изображения в условиях космического пространства представляют собой эффекты в виде треков от падающих на ФПМ протонов [1]. Таким образом, определить и отсеleccionировать смазанное изображение звезды крайне трудно.

Наиболее простой способ борьбы со “смазом” изображения заключается в понижении времени накопления сигналов на ФПМ, что приводит к уменьшению чувствительности ЗД, а, следовательно, снижает вероятность наличия необходимого для распознавания числа звезд в поле зрения. Тем не менее форма изображения звезды на ФПМ сохраняется в силу того, что “смаз” пропорционален времени накопления сигналов.

Обнаружить неяркие звезды и распознать их при малом времени накопления невозможно, поскольку для этого при больших ($> 0,5^\circ/\text{с}$) угловых скоростях движения понадобятся более яркие звезды.

Проведем выборку звезд, указанных в приборном каталоге, так, чтобы новый, назовем его скоростной, каталог состоял из звезд, звездная величина которых меньше предельной звездной величины, характерной для заданного времени накопления. Подобная оценка может быть получена расчетно-экспериментальным путем с использованием высокоточного имитатора звезды или в результате натуральных испытаний. Предположим, что для угловой скорости $3^\circ/\text{с}$ и соответствующего ей времени накопления 50 мс оценка предельной звездной величины

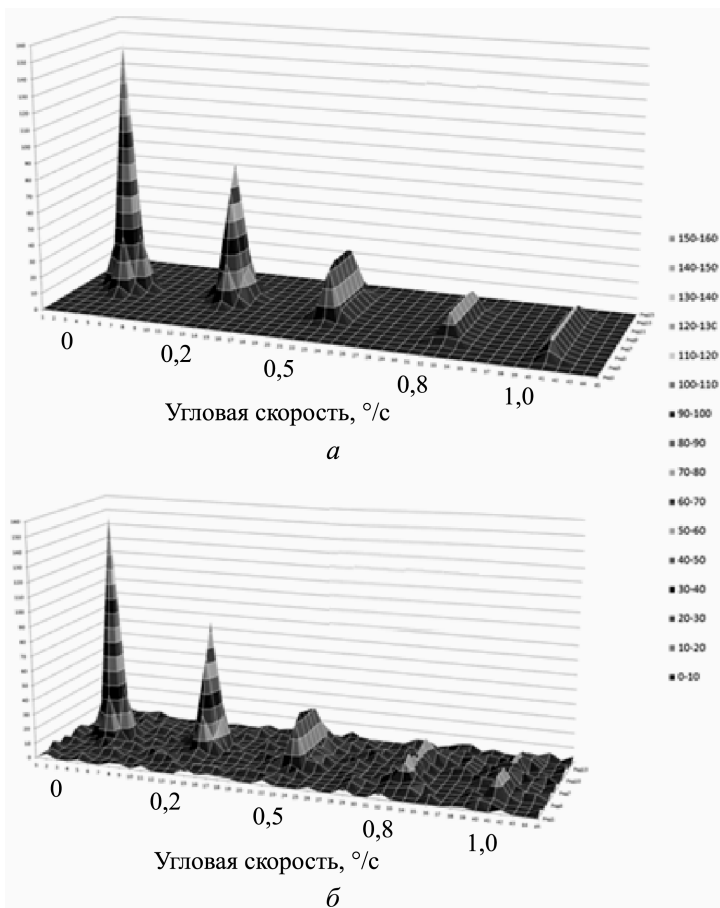


Рис. 1. Распределение изображения звезд на ФПМ для различных значений угловой скорости вращения КА без учета шумов с ФПМ (*а*) и с их учетом (*б*)

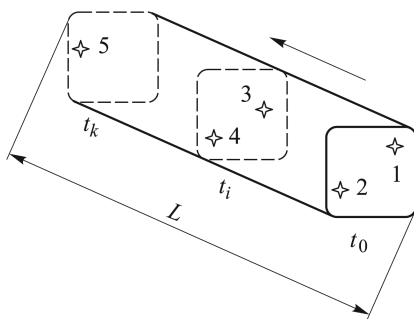
составляет $m_v = 3,5$. Зная угловую скорость, выполняем распознавание отслеживаемых звезд по скоростному каталогу. Поскольку в этом каталоге содержится значительно меньше звезд, для корректного распознавания могут допускаться большие погрешности определения углов между звездами.

Такой подход избавит от повышенных погрешностей определения угловых межзвездных расстояний, что улучшит вероятность распознавания. Однако остается проблема отсутствия в поле зрения достаточного числа звезд для распознавания. Для решения этой проблемы предложен следующий метод: осуществлять слежение за световыми источниками, регистрируемыми на ФПМ, как в обычном ЗД, и использовать значение вектора угловой скорости для отслеживания тех звезд, которые уже вышли из поля зрения. Значение угловой скорости вычисляется по показаниям датчиков угловой скорости (ДУС).

Метод повышения вероятности распознавания звезд с помощью информации об угловой скорости проиллюстрирован на рис. 2.

Рис. 2. Иллюстрация метода повышения вероятности распознавания звезд с помощью информации об угловой скорости:

t_0 — первый кадр визирования ярких звезд с малым временем накопления; t_i — промежуточный кадр визирования; t_k — последний кадр визирования; L — длина траектории (пропорциональна угловой скорости); стрелкой показано направление движения поля зрения по небесной сфере; 1–5 — номера звезд



На момент времени визирования первого кадра в поле зрения находится всего две потенциальные звезды, на момент времени визирования последнего кадра — только одна звезда 5, при этом координаты звезд 1–4 рассчитываются интегрированием угловой скорости с ДУС. Учитывая, что погрешности ДУС имеют временной характер, погрешности определения координат звезд 1 и 2 будут выше, чем звезд 3, 4 и тем более 5.

Теоретически угловую скорость можно получить от ДУС КА, однако этот подход не оптимален ввиду сложности организации обмена данными между системой управления КА и автономным ЗД (который работает как оконечное устройство).

Указанную задачу предложено решить путем встраивания в конструкцию звездного датчика МЭМС ДУС, являющегося компактным и малопотребляющим прибором, поэтому существенного “утяжеления” конструкции ЗД не ожидается. Как будет показано далее, для применения рассмотренного метода не требуется очень точного определения угловой скорости (что может обеспечиваться только прецизионными ДУС).

Вопросы поиска, селекции и слежения за световыми источниками, регистрируемыми на ФПМ, известны [2], поэтому их рассматривать не будем. Подробнее остановимся на слежении за источниками по показаниям МЭМС ДУС. Для пересчета координат источников в приборной системе координат (ПСК) на необходимый момент времени используем следующую формулу:

$$\vec{s}'_i = q \cdot \vec{s}_i \cdot q^*,$$

где \vec{s}'_i — вектор направляющих косинусов i -й звезды в ПСК на заданный момент времени в виде кватерниона; $\vec{s}_i = (0, s_{xi}, s_{yi}, s_{zi})$; q — кватернион, характеризующий поворот ПСК в инерциальном пространстве от момента времени визирования звезды до заданного момента времени; q^* — соответствующий сопряженный кватернион.

Для расчета кватерниона, характеризующего изменение ориентации, путем интегрирования показаний ДУС (угловой скорости) приме-

ним метод интегрирования кинематических уравнений Пуассона для кватернионов, связывающих параметры ориентации и угловую скорость вращения объекта (в рассматриваемом случае ПСК):

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \cdot \vec{\Omega}.$$

Система дифференциальных уравнений будет иметь вид

$$\begin{aligned}2\dot{\lambda}_0 &= -\lambda_1\omega_x - \lambda_2\omega_y - \lambda_3\omega_z; \\2\dot{\lambda}_1 &= \lambda_0\omega_x + \lambda_2\omega_z - \lambda_3\omega_y; \\2\dot{\lambda}_2 &= \lambda_0\omega_y + \lambda_3\omega_x - \lambda_1\omega_z; \\2\dot{\lambda}_3 &= \lambda_0\omega_x + \lambda_1\omega_y - \lambda_2\omega_z.\end{aligned}$$

Решение этой системы уравнений можно найти численными методами, например методом Рунге–Кутты четвертого порядка. Таким образом, для успешного распознавания группы звезд при больших (например, до 3 °/с) угловых скоростях необходимо:

- измерить угловую скорость;
- выбрать время накопления сигналов на ФПМ в соответствии с угловой скоростью, полученной от МЭМС ДУС, и необходимый скоростной каталог;
- измерить координаты ярких звезд в ПСК;
- продолжать слежение за звездой при выходе ее за поле зрения путем интегрирования угловой скорости с ДУС;
- набрать достаточное число звезд для успешного распознавания.

Для подтверждения эффективности предлагаемого метода распознавания было проведено математическое моделирование с помощью специально разработанной программы на языке высокого уровня. В качестве алгоритма распознавания группы звезд был использован один из вариантов алгоритма прибора 348К, разработанный ОАО “НПП “Геофизика-Космос”. Базовый каталог звезд включает в себя 1422 звезды со звездными величинами $m_v < 5,3$, т.е. можно сформировать 29 856 пар звезд.

Исходные данные для математического моделирования:

- 1) скоростной каталог звезд для m_v $3,5 < 4,0 < 4,5$;
- 2) каталог пар для распознавания для каждого скоростного каталога;
- 3) смоделированные траектории перемещения поля зрения ЗД по небесной сфере, содержащие координаты и номера звезд, которые попадают в поле зрения ЗД за время движения.

Погрешности определения координат звезд в ПСК по показаниям ДУС и ЗД задавались с учетом их упрощенных математических моделей:

— для 3Д случайная погрешность определения координат X, Y центров изображений звезд на ФПМ со среднеквадратичным отклонением (СКО) $\sigma_{x,y} = 0,1$ пиксел ФПМ;

— для оси чувствительности ДУС, установленного по оси X , в соответствии с упрощенной моделью измерений

$$w_{\text{изм}} = w_{\text{ист}} + \delta w_{\text{ссл}} + b(t),$$

где $w_{\text{изм}}$ — выходной (измеренный) сигнал ДУС; $w_{\text{ист}}$ — заданная (истинная) при моделировании угловая скорость; $\delta w_{\text{ссл}}$ — случайная погрешность определения угловой скорости (шум ДУС) с СКО $\sigma_w = 1'/\text{с}$; $b(t)$ — временная нестабильность показаний ДУС (тренд). Характер тренда задавался линейным с наклоном $1'/\text{с}$. Выражения для погрешности определения координат осей чувствительности ДУС, установленных по осям Y и Z , аналогичны.

Коррекция показаний ДУС не моделировалась (так как ориентация еще не была определена), следовательно, погрешности определения координат звезд по показаниям ДУС достигали $10'$ (~ 10 пиксел ФПМ) и более (в зависимости от времени прохождения траектории). Для проверки помехоустойчивости алгоритма на каждой итерации моделирования к списку распознаваемых звезд добавлялось случайное число ложных источников (от 5 до 10).

Математическая модель распознавания проводит обработку каждой траектории (всего таких траекторий 1 529 830, равномерно распределенных по небесной сфере) и осуществляет распознавание по соответствующему скоростному каталогу (в зависимости от угловой скорости). Результат моделирования — оценка вероятности распознавания по результатам обработки всех траекторий как отношение числа распознанных фрагментов к общему числу фрагментов. Кроме того, выполнялась оценка максимального времени ожидания необходимого числа звезд для распознавания. Исходные данные и результаты математического моделирования приведены в таблице.

По данным, указанным в таблице, вероятность распознавания группы звезд для угловых скоростей до $2^\circ/\text{с}$ не отличается от базовой. Таким образом, математическое моделирование подтверждает правильность выбранного подхода.

Отметим, что число пар звезд во всех скоростных каталогах приблизительно соответствует числу пар в штатном каталоге. Следовательно, при проведении распознавания группы звезд по скоростному каталогу временные затраты будут одинаковы.

Вывод. В предлагаемом методе используется информация об угловой скорости вращения ПСК, что позволяет проводить распознавание даже при отсутствии необходимого числа звезд в мгновенном поле зрения. Значение угловой скорости берется по показаниям встроенных в

Исходные данные и результаты математического моделирования

Параметры	Каталог			
	Штатный	Скоростной		
		№ 1	№ 2	№ 3
<i>Исходные данные</i>				
Угловая скорость ω , °/с	$\leq 0,5$	0,5...1,0	1...2	2...3
Предельная звездная величина m_v	5,3	4,5	4,0	3,5
Число, шт.:				
звезд в каталоге	1422	1114	712	410
пар звезд в каталоге пар	29 829	33 990	30 024	27 625
<i>Результаты математического моделирования</i>				
Вероятность распознавания, %	99,93	99,83	99,82	90,30
Максимальное время распознавания с учетом сканирования небесной сферы, с	≤ 5	5	10	16

звездный датчик МЭМС ДУС. Причем значение угловой скорости может быть достаточно грубым, что характерно как раз для МЭМС ДУС. Привязка вектора угловой скорости к инерциальной системе координат не требуется. Отметим также, что предложенный метод обладает существенными преимуществами 3Д со встроенными МЭМС-гироскопами, по сравнению с современными звездными приборами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аванесов Г.А., Акимов В.В., Воронков С.В. Результаты испытаний ПЗС-матриц российского и зарубежного производства на источниках заряженных частиц // Всеросс. науч.-техн. конф. “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”. Сб. трудов. 22–25 сентября 2008 г., Россия, Таруса.
2. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 248 с.

REFERENCES

- [1] Avanesov G.A., Akimov V.V., Voronkov S.V. Results of testing Russian and foreign CCDs on charged particle sources. *Sb. Tr. Vseross. Nauch.-Tekhn. Konf. “Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov”*. [Proc. All-Russ. Sci. Tech. Conf. “Modern problems of attitude control and navigation of spacecrafts”], 2008, Tarusa (in Russ.).
- [2] Fedoseev V.I., Kolosov M.P. Optiko-elektronnyye pribory orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov [Optoelectronic devices for attitude control and navigation of spacecrafts]. Moscow, Logos Publ., 2007. 248 p.

Статья поступила в редакцию 01.07.2013

Владимир Олегович Князев — аспирант кафедры “Приборы и системы ориентации, стабилизации, навигации” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заместитель начальника отдела ОАО “НПП “Геофизика-Космос”. Автор семи научных работ в области космического приборостроения и оптико-электронных систем ориентации космических аппаратов. ОАО “НПП “Геофизика-Космос”, Российская Федерация, 107497, Москва, Иркутская ул., д. 11, корп. 1.

V.O. Knyazev — post-graduate of “Instruments and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation” department of the Bauman Moscow State Technical University, deputy head of department of ОАО “NPP “Geofizika-Kosmos”. Author of seven publications in the field of space instrument engineering and optic-electronic systems of attitude control of spacecrafts.

ОАО “НПП “Геофизика-Космос”, Irkutskaya ul. 11, korpus 1, Moscow, 107497 Russian Federation.

Алексей Андреевич Поздняков — аспирант кафедры “Микросистемная техника, материаловедение и технологии” МГИЭМ, инженер ОАО “НПП “Геофизика-Космос”. Автор двух научных работ в области космического приборостроения и оптико-электронных систем ориентации космических аппаратов.

ОАО “НПП “Геофизика-Космос”, Российская Федерация, 107497, Москва, Иркутская ул., д. 11, корп. 1.

A.A. Pozdnyakov — post-graduate of “Microsystem Engineering, Materials Science and Technologies” department of the Moscow Institute of Electronics and Mathematics of Higher School of Economics, engineer of ОАО “NPP “Geofizika-Kosmos”. Author of two publications in the field of space instrument engineering and optic-electronic systems of attitude control of spacecrafts.

ОАО “НПП “Геофизика-Космос”, Irkutskaya ul. 11, korpus 1, Moscow, 107497 Russian Federation.