
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 527.62:523.2+623.466.33

Т. В. ДАНИЛОВА, М. А. АРХИПОВА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ НА ОСНОВЕ АСТРОИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ О ПАРАМЕТРАХ ОРБИТЫ

Предлагается способ определения ориентации космического аппарата в геоцентрической экваториальной системе координат при отсутствии данных о параметрах орбиты на основе астроизмерений и последующего распознавания звезд.

Ключевые слова: распознавание звезд, автономная ориентация космического аппарата, оптико-электронный прибор, астроизмерения.

Задача определения ориентации корпуса космического аппарата (КА) в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат (ГЭИСК) решается при следующих предположениях:

- КА находится в состоянии орбитального полета, при этом априорные данные о параметрах орбиты отсутствуют;
- на корпусе КА жестко закреплен оптико-электронный прибор (ОЭП) под углами λ и ρ ;
- КА оснащен системой стабилизации, которая удерживает корпус аппарата относительно осей текущей орбитальной системы координат с некоторой постоянной или меняющейся в малом диапазоне погрешностью; эта погрешность по тангажу, рысканью и крену может достигать единиц градусов.

На каждом измерительном сеансе задача расчета направляющих векторов осей X , Y и Z связанной системы координат (ССК), где X — продольная ось, Y и Z — боковые, решается в три этапа [1, 2]:

- 1) распознавание звезд, наблюдаемых в поле зрения ОЭП;
- 2) расчет ортов приборной системы координат (ПСК) в ГЭИСК;
- 3) определение ориентации КА в ГЭИСК.

Рассмотрим эти этапы подробно.

Распознавание звезд. Распознавание звезд производится на основе базы звезд, сформированной по каталогу HIPPARCOS, который в настоящее время является наиболее точным и в силу этого наиболее пригодным для решения задач навигации и ориентации на борту. Каталог HIPPARCOS содержит 118 218 записей (в каждой 78 полей), из которых отобрано 117 955 записей по критерию $\alpha \neq 0$ и $\delta \neq 0$, здесь α и δ — прямое восхождение и склонение звезды соответственно.

Каждая из выбранных записей содержит следующую информацию о звезде: номер по каталогу HIPPARCOS, значения α и δ , звездная величина, собственное движение по α , собственное движение по δ , тригонометрический параллакс. Три последних параметра предназначены для приведения сформированного каталога звезд к эпохе, отвечающей заданным дате и времени, например началу мерного интервала.

При рассмотрении модели ОЭП, чувствительность которого обозначим через q , создается динамическая (или рабочая) база звезд, куда включаются звезды, звездная величина которых, с учетом погрешности измерения, не превосходит q .

Алгоритмом предусмотрена разбивка небесной сферы на четырнадцать областей, в соответствии с чем и динамическая база разбивается на четырнадцать частей с учетом таких характеристик ОЭП, как чувствительность и поле зрения.

В общем случае распознавание звезд может производиться в одном из следующих режимов: локальном, смешанном и глобальном, первые два из которых применяются при наличии априорных данных об орбите, когда рассчитывается примерное направление оптической оси ОЭП и определяется область, в которую эта ось направлена [2]. В рассматриваемом случае, при отсутствии априорных данных об орбите, распознавание производится в глобальном режиме последовательно по всем четырнадцати областям.

Максимальное количество распознаваемых звезд (Q) может варьироваться от 10 до 50. Очевидно, что при увеличении Q надежность результатов распознавания повышается. Однако опыт моделирования показывает, что эти результаты достаточно надежны и при $10 \leq Q \leq 20$. Если наблюдаемое количество звезд $\tilde{Q} < Q$, то полагается $Q = \tilde{Q}$. Распознавание не проводится, если $\tilde{Q} < 5$.

Начальным шагом для всех режимов распознавания является формирование матрицы $Z^{(0)} = \left\| Z_{kl}^{(0)} \right\|$, $k, l = 1, \dots, Q$, элементы которой представляют собой угловые расстояния между звездами, наблюдаемыми в поле зрения ОЭП, которые рассчитываются после измерения приборных координат звезд:

$$Z_{kl}^{(0)} = \begin{cases} \arccos(a_k, a_l), & k = 1, \dots, Q-1; l = k+1, \dots, Q; \\ 0, & k = 1, \dots, Q; l = 1, \dots, k. \end{cases} \quad (1)$$

Направляющие косинусы звезд в ПСК $a_k \left(\xi_k^0, \eta_k^0, \zeta_k^0 \right)$ рассчитываются известным образом по измеренным приборным координатам звезд (ξ_k, η_k) , $k = 1, \dots, Q$, и фокусному расстоянию прибора f [1, 3].

Ключевым является алгоритм распознавания по области разбиения небесной сферы с заданным номером. Суть этого алгоритма заключается в следующем.

Для каждой звезды с измеренными параметрами (ξ_k, η_k, m_k) , где m_k — звездная величина, $k = 1, \dots, Q$, формируется список „претендентов“, в который включаются звезды, принадлежащие данной области и близкие к данной звезде по звездной величине. Степень этой „близости“ определяется точностными характеристиками ОЭП по оценке звездной величины, при этом приборная погрешность измерения звездной величины (Δq) известна и задается в процентах. Отметим, что проверка алгоритма распознавания на имитационной модели [2, 4] показала его надежность при $\Delta q \in [3, 0; 50, 0]$.

Путем перебора звезд из этих списков, организованного по разработанному оригинальному алгоритму [2], формируются цепочки звезд размером Q (по одной звезде из каждого списка). При включении звезды в цепочку проверяются следующие условия: все звезды цепочки должны быть одновременно „наблюдаемы“ в поле зрения ОЭП, т.е. их взаимные угло-

вые расстояния не должны превышать поля зрения ОЭП; контролируется разность измеренных и фактических угловых расстояний, т.е. проверяется истинность условия

$$|Z_{kl} - Z_{kl}^{(0)}| < \Delta U, \quad (2)$$

где Z_{kl} — фактические угловые расстояния между звездами, определяемые по бортовому каталогу; ΔU — малая величина, рассчитываемая в зависимости от погрешности измерения координат звезд:

$$\Delta U = K_U \sqrt{2} \cdot (|\Delta P| + 3\sigma P), \quad (3)$$

здесь ΔP , σP — систематическая и случайная погрешности ОЭП соответственно; $K_U \in [1; 2]$ — коэффициент, значение которого изменяется в зависимости от используемого режима распознавания.

Если не выполняется хотя бы одно из проверяемых условий, то звезда в цепочку не включается, цепочка на этом „обрывается“, и выбирается следующая звезда из этого же списка „претендентов“.

По окончании формирования допустимой цепочки размером Q рассчитывается матрица $Z = \|Z_{kl}\|$, $k = 1, \dots, Q-1$, $l = k+1, \dots, Q$, и вычисляется значение функции

$$S(Z) = \sum_{k=1}^{Q-1} \sum_{l=k+1}^Q (Z_{kl} - Z_{kl}^{(0)})^2. \quad (4)$$

Функция S определяет меру различия между двумя рисунками звезд, один из которых наблюдается в поле зрения ОЭП, а другой составлен из звезд — элементов допустимых цепочек.

Далее определяется минимальное значение функции S по всем допустимым цепочкам, которое и обеспечивает результат распознавания — массив звезд, в наибольшей степени отвечающий наблюдаемому в поле зрения ОЭП рисунку звезд. Результат распознавания формируется путем сравнения найденного значения S_{\min} с некоторым малым допустимым значением ΔS , которое рассчитывается исходя из погрешностей измерения и величины Q :

$$\Delta S = K_S \frac{2000}{9} \left(1 + \frac{(Q-1)^2}{2} \right) (|\Delta P| + 3\sigma P) \left(\frac{3600 \cdot 180}{\pi} \right)^2 C_1, \quad (5)$$

где $K_S \in [1, 5; 25]$ — коэффициент, значение которого изменяется в зависимости от используемого режима распознавания; $C_1 = 0,8860987877''$ — усредненное значение величины S_{\min} , полученное опытным путем при $\Delta P = 0$, $\sigma P = 0,1$ и $Q = 10$.

Если

$$S_{\min} < \Delta S, \quad (6)$$

то результат распознавания принимается, в противном случае звезды считаются нераспознанными.

Изменение величин ΔU и ΔS (формулы (3) и (6)) имеет большое значение для различных целей исследования. Если необходимо добиться на мерном интервале наибольшего числа положительных распознаваний (например, при отсутствии данных об орбите, т.е. в рассматриваемом случае), тогда эти величины следует увеличить, а при моделировании решения задачи навигации и ориентации — уменьшить в целях исключения грубых измерений.

Определение ориентации ОЭП в ГЭИСК. В результате распознавания звезд, осуществленного согласно формулам (1)—(6), имеем Q идентифицированных звезд. Принимая во внимание равенство угловых расстояний между ортами a_0 наблюдаемых звезд и осями ПСК,

Точность решения задачи определяется точностью расчета элементов матриц M_1 и M_2 .

Результаты моделирования. Для исследования точности предложенного алгоритма в среде программирования C++ Builder 6.0 была создана имитационная модель. Согласно принципам объектно-ориентированной технологии разработаны классы, моделирующие функционирование отдельных элементов бортового комплекса навигации и ориентации. К таковым относятся классы AS_VOZMU (модель возмущений), AS_SUN_SYSTEM (модель солнечной системы), AS_INTEGR (интегрирование уравнений движения), AS_ORBITA (модель движения КА с учетом заданных возмущений и методов интегрирования), AS_OEP_PRIBOR (модель оптико-электронного прибора, реализующая функции измерения координат, звездных величин, распознавания звезд и расчета ортов приборных осей) и др. Для целей исследования разработан класс AS_STATISTIC, который позволяет рассчитывать статистические характеристики по заданной выборке (среднее, среднеквадратическое отклонение, минимум, максимум и др.).

Эксперименты проводились для орбит, параметры которых представлены в табл. 1. Данные об орбите использовались для моделирования измерений. В модели движения КА гравитационное поле представлялось в виде точечных масс [1, 2], в зависимости от высоты орбиты учитывались гравитационное влияние Солнца и Луны, световое давление, тормозящее воздействие атмосферы. Интегрирование уравнения движения КА проводилось методом Рунге — Кутты и Адамса четвертого порядка с корректировкой [5]. При этом варьировались погрешности системы стабилизации, углы закрепления ОЭП на корпусе КА (λ, ρ), систематическая и случайная погрешности ОЭП.

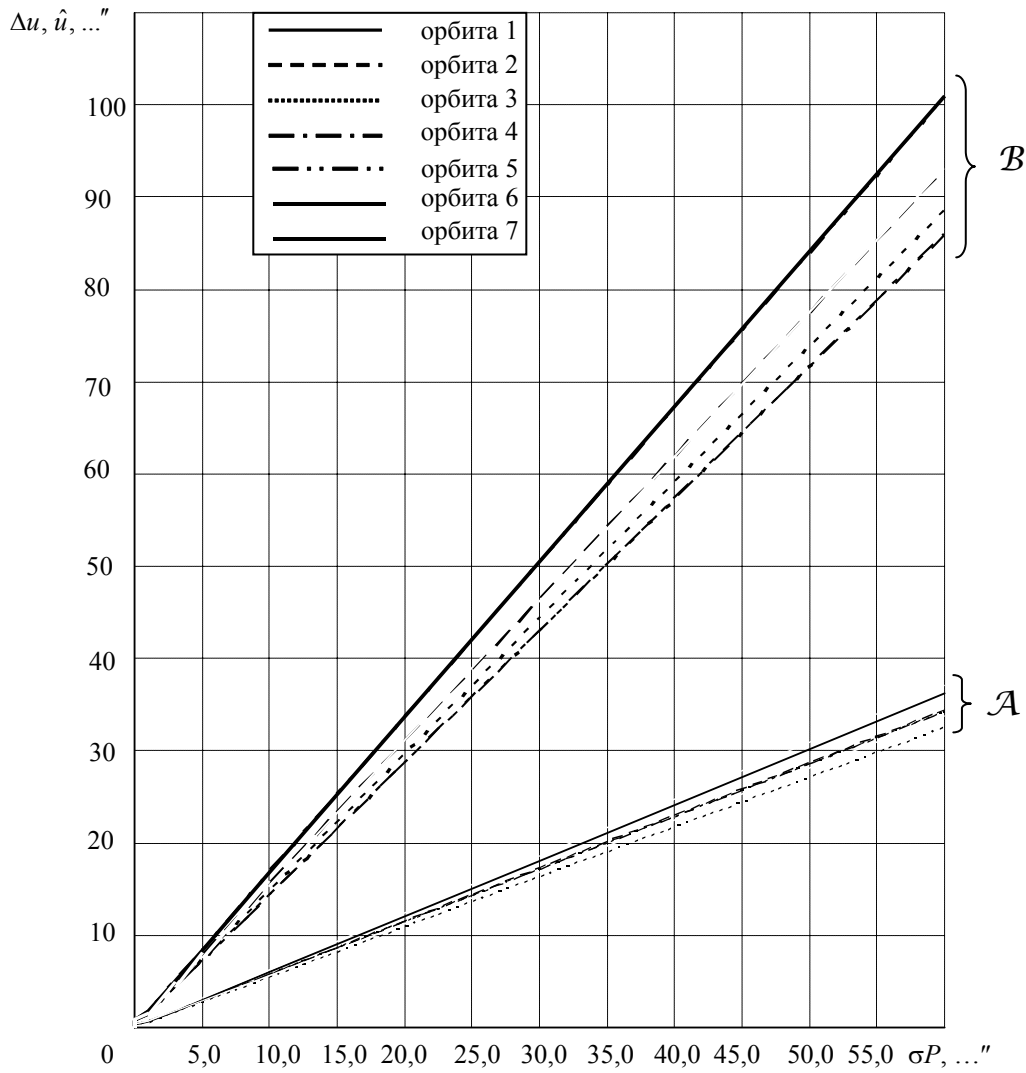
Таблица 1

Номер орбиты	Параметры орбиты					
	Большая полуось a , км	Эксцентриситет e	Наклонение i, \dots°	Восходящий узел Ω, \dots°	Точка перигея ω, \dots°	Истинная аномалия ϑ, \dots°
1	6780	0,01	85	60	0	0
2	7378	0,01	84	0	0	0
3	7378	0,01	85	0	0	0
4	25478	0,01	63	120	60	0
5	27800	0,75	0,01	120	60	0
6	29000	0,75	63	0	0	0
7	42400	0,01	0	0	30	0
Дата (день, месяц, год)			Время (часы, минуты, секунды)			
02.03.2011			01:02:03.860			

Измерения проводились с интервалом 50 с для низких орбит, 180 с — для средних, 300 с — для геостационара и орбит 4, 5, 6; количество измерений — не менее 100...200 на мерном интервале в один виток.

Анализировались углы u между фактическими и расчетными направлениями оптической оси ζ ОЭП и осей КА, определяющие точность представленного алгоритма. Для угла u рассчитывалось среднее значение (Δu), среднеквадратичное отклонение (σ_u), минимальное (u_{\min}) и максимальное (u_{\max}) значения, а также оценка $\hat{u} = \Delta u + 3\sigma_u$.

На рисунке представлен график зависимости Δu и \hat{u} от σP (группы кривых \mathcal{A} и \mathcal{B} соответственно) при погрешности стабилизации в 1° (по тангажу, рысканью и крену), $\lambda = 45^\circ$, $\rho = 45^\circ$ и $\Delta P = 0$ для всех исследованных орбит. Анализ графиков показывает, что характеристики Δu и \hat{u} слабо зависят от орбиты. Более того, аналогичная закономерность обнаруживается и при других значениях погрешностей стабилизации и углах крепления ОЭП.



Результаты моделирования для орбиты 1 представлены в табл. 2, из которой видно, что при $\Delta P = 0$ погрешность определения ориентации корпуса КА примерно в шесть раз больше погрешности расчета ориентации оптической оси ОЭП, а при $\Delta P \neq 0$

$$\hat{u}_{КА} = \kappa \hat{u}_{ОЭП}, \quad \kappa \in (0,6; 3).$$

Таблица 2

$\Delta P, \sigma P, \dots$	Ось	Погрешности расчета направлений оптической оси ζ ОЭП и осей X, Y, Z ССК				
		$\Delta u, \dots$	$\sigma u, \dots$	u_{\min}, \dots	u_{\max}, \dots	\hat{u}, \dots
0,0; 0,1	ζ	0,05689	0,0336862	0,00435	0,17362	0,15795
	X	0,29266	0,2044993	0,02766	0,92855	0,90616
	Y	0,28731	0,2000521	0,01792	0,87297	0,88747
	Z	0,26675	0,2145556	0,01229	1,01040	0,91042
0,0; 0,5	ζ	0,28469	0,1682043	0,02608	0,86809	0,78931
	X	1,46341	1,0224021	0,13964	4,64278	4,53062
	Y	1,43665	1,0001982	0,09175	4,36489	4,43725
	Z	1,33383	1,0727300	0,06101	5,05203	4,55202
0,0; 1,0	ζ	0,56940	0,3364002	0,05216	1,73620	1,57860
	X	2,92683	2,0447993	0,27931	9,28552	9,06123
	Y	2,87331	2,0003880	0,18354	8,72975	8,87447
	Z	2,66765	2,1454652	0,12179	10,10418	9,10405

Продолжение табл. 2

$\Delta P, \sigma P, \dots''$	Ось	Погрешности расчета направлений оптической оси ζ ОЭП и осей X, Y, Z ССК				
		$\Delta u, \dots''$	$\sigma u, \dots''$	u_{\min}, \dots''	u_{\max}, \dots''	\hat{u}, \dots''
0,0; 3,0	ζ	1,70822	1,0092208	0,15645	5,20879	4,73588
	X	8,78049	6,1344057	0,83796	27,85609	27,18371
	Y	8,61992	6,0010818	0,55078	26,18897	26,62316
	Z	8,00296	6,4364526	0,36538	30,31391	27,31232
0,0; 5,0	ζ	2,84707	1,6820610	0,26093	8,68166	7,89325
	X	14,63415	10,2240282	1,39659	46,42601	45,30623
	Y	14,36651	10,0016707	0,91806	43,64782	44,37152
	Z	13,33827	10,7275207	0,60890	50,52547	45,52083
0,0; 10,0	ζ	5,69428	3,3642552	0,52283	17,36506	15,78704
	X	29,26825	20,4481537	2,79312	92,84803	90,61271
	Y	28,73288	20,0026822	1,83657	87,29328	88,74092
	Z	26,67654	21,4555405	1,21740	101,06237	91,04316
0,0; 30,0	ζ	17,08458	10,0943795	1,57995	52,11603	47,36771
	X	87,80423	61,3457032	8,37870	278,49604	271,84134
	Y	86,19704	60,0002378	5,51489	261,85161	266,19776
	Z	80,02964	64,3726410	3,64734	303,32401	273,14757
1,0; 0,1	ζ	1,39915	0,0488519	1,28191	1,55028	1,54571
	X	1,42002	0,1535081	0,96011	1,89920	1,88054
	Y	0,77920	0,2720871	0,22850	1,57643	1,59546
	Z	1,24492	0,1919204	0,92673	1,95810	1,82068
1,0; 0,5	ζ	1,40399	0,2462114	0,81876	2,18038	2,14263
	X	2,03828	0,9192998	0,62515	4,92618	4,79618
	Y	1,62074	1,0500766	0,05171	5,03172	4,77097
	Z	1,86938	0,9248337	0,66181	5,81358	4,64388
3,0; 0,5	ζ	4,19530	0,2446639	3,61293	4,95515	4,92929
	X	4,42872	0,7979229	2,06687	6,80972	6,82249
	Y	2,59873	1,2239888	0,48638	6,44935	6,27070
	Z	3,90494	0,9123128	2,60707	7,68343	6,64188
3,0; 1,0	ζ	4,19792	0,4913845	3,03267	5,73731	5,67208
	X	5,13803	1,7429077	1,32006	10,51613	10,36675
	Y	3,62695	2,1654611	0,34223	10,76822	10,12333
	Z	4,63830	1,7808345	2,54140	12,49355	9,98080
5,0; 0,5	ζ	6,99578	0,2442565	6,40958	7,75141	7,72855
	X	7,10011	0,7675561	4,80055	9,49613	9,40278
	Y	3,89601	1,3604198	1,14273	7,88222	7,97727
	Z	6,22458	0,9596059	4,63366	9,79064	9,10340
5,0; 1,0	ζ	6,99152	0,4897925	5,82779	8,51564	8,46089
	X	7,56832	1,6305750	2,84083	12,30185	12,46005
	Y	4,62333	2,3479914	1,09709	12,18633	11,66731
	Z	6,70297	1,7936679	4,18338	14,37239	12,08398
5,0; 1,5	ζ	6,99414	0,7365655	5,24749	9,29813	9,20384
	X	8,28196	2,5804596	1,96307	16,15348	16,02334
	Y	5,66422	3,2851567	0,81863	16,50594	15,51969
	Z	7,44418	2,6593206	4,21766	19,19192	15,42215
5,0; 2,0	ζ	7,00361	0,9838830	4,66925	10,09466	9,95526
	X	9,17651	3,5674189	3,22365	20,33033	19,87877
	Y	6,84100	4,2652661	0,32147	20,83150	19,63680
	Z	8,34540	3,6114793	3,86380	24,10711	19,17984

Разработанная имитационная модель позволяет сформировать требования к характеристикам ОЭП для достижения требуемой точности определения ориентации корпуса КА в ГЭИСК. Например, при $\Delta u \leq 5''$ погрешности ОЭП должны быть следующими: $\Delta P \leq 1''$, $\sigma P \in [0,1''; 0,5'']$.

На основе представленного экспериментального материала можно сделать очевидный вывод, что при отсутствии априорных данных об орбите и фактической ориентации корпуса КА относительно текущей орбитальной системы координат точность расчета направлений осей ОЭП и КА в ГЭИСК определяется только погрешностями прибора и не зависит от орбиты, ориентации КА и углов закрепления ОЭП на его корпусе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автоматизированная система исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов: Учеб. пособие. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2006.
2. Кузнецов В. И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов. Монография. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. В 2 ч.
3. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Алгоритмы распознавания „рабочих“ звезд по звездному полю // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 16—23.
4. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Система автономной навигации и ориентации ИСЗ, основанная на виртуальных измерениях зенитных расстояний звезд // Космические исследования. 2011. Т. 49, № 6. С. 551—562.
5. Смолицкий Х. Л., Рыжиков Ю. И. Вычислительная математика: Учеб. пособие. Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1976.

Сведения об авторах

- Тамара Валентиновна Данилова** — канд. техн. наук; Военный институт Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург;
E-mail: danitoma58@yandex.ru
- Марина Александровна Архипова** — Военный институт Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; науч. сотрудник;
E-mail: marina_arhipova@mail.ru

Рекомендована
Военным институтом ВКА
им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
02.04.13 г.