

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 523.34:629.78:527.62  
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-4-245-254

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВИРТУАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ ЗВЕЗД ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОРИЕНТАЦИИ

В. И. КУЗНЕЦОВ, С. Д. КАЛАШНИКОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vka@mil.ru*

Рассмотрены особенности применения метода виртуальных измерений зенитных расстояний звезд в системе ориентации космического аппарата, представлены результаты моделирования системы ориентации при различных алгоритмах решения навигационных задач. Задача ориентации решается на основе определения орбиты космического аппарата с помощью двух оптико-электронных приборов (ОЭП) с зарядовой связью, установленных в кардановых подвесах, для наведения на специально выбранные яркие звезды небосвода. По информации от них определяется орбита, которая используется алгоритмом задачи ориентации. По информации от третьего ОЭП (возможно и четвертого), жестко связанного с корпусом аппарата, определяют параметры ориентации корпуса в пространстве, используя специальные механизмы и алгоритмы метода наименьших квадратов в среднем за мерный интервал.

***Ключевые слова:** автономность космического аппарата, метод виртуальных измерений зенитных расстояний звезд, система ориентации космического аппарата*

**Введение.** Определение орбиты и положения корпуса космического аппарата (КА) относительно его центра масс относится к сложнейшим задачам анализа и синтеза движения КА. Эти задачи характеризуются многопараметричностью, алгоритмической сложностью и требуют для своего качественного, эффективного решения учета многочисленных факторов полета.

Как правило, разрабатываются алгоритмы и программы для определенной задачи: только навигации или только ориентации. При этом решения выполняются однократно, а отсутствие базы исходных данных и результатов решения задач не позволяет автоматизировать процедуру сравнительного анализа при использовании различных частных и (или) общих алгоритмов. Для преодоления этих проблем разработан метод ориентации КА по виртуальным измерениям зенитных расстояний звезд [1—12]. Однако применимость метода не была должным образом исследована, особенно с учетом специфики алгоритма ориентации.

Основное назначение метода виртуальных измерений зенитных расстояний звезд — повышение автономности работы и точности измерений параметров движения навигационных КА, поэтому разработка метода велась прежде всего с целью обеспечения навигации, описания особенностей и способов решения задачи именно навигации КА. В работах авторов настоящей статьи алгоритм определения ориентации подробно не изложен, за исключением [1].

Основные результаты применения метода получены в специфической среде автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации КА [5]. Эта система нацелена на упрощение разработки и управления решением ряда близких задач. Она позволяет одновременно вести расчет для обеспечения навигации, ориентации и синхронизации временных шкал [14]. „Мягкое“ связывание задач навигации и ориентации друг с другом на основе метода интегрирования уравнений движения КА так, чтобы более простая задача частично решалась с использованием алгоритмов сложной, позволяет путем сравнения получить оптимальные решения. Хотя результаты решения задач должны различаться, при определенных условиях видна корреляция данных. Далее, при оценке результатов моделирования, это будет указываться.

**Принцип работы измерительной системы.** Моделируемая измерительная система, реализующая метод навигации и ориентации, состоит из трех матричных оптико-электронных приборов (ОЭП) с зарядовой связью. Для решения задач ориентации и навигации соответствующими ОЭП измеряются приборные положения известных (распознанных) звезд. Два ОЭП помещаются в кардановы подвесы с целью наведения на звезды, выбранные из списка наиболее ярких, таким образом, чтобы направления на них были близки к оптимальным для параметров опорной орбиты. По информации от этих измерителей решается навигационная задача. Третий ОЭП, жестко закрепленный на корпусе, используя специальные механизм и алгоритм, определяет параметры ориентации корпуса в пространстве, сглаженные в среднем за мерный интервал методом наименьших квадратов. С помощью упомянутого механизма реализуется активный (А) или пассивный (П) режим алгоритма решения задачи ориентации. Активный режим предусматривает использование силовой гироскопической системы стабилизации КА, строящей текущую орбитальную систему координат (ТОСК). Высокая точность навигации обеспечивается алгоритмическим выбором звезд. Пассивный режим предусматривает конструктивное дополнение к корпусу КА в виде блока (например, антенны, принимающей сигналы пульсара), с тем чтобы общая жесткая структура „КА — Блок“ под действием магнитных и гравитационных сил Земли принимала направление местной вертикали: тем или иным способом получается геоцентрическое положение первого луча, образующего искомый зенитный угол звезды. Положение второго луча определяется измерением приборных координат наиболее яркой из попавших в поле зрения звезд (рис. 1).

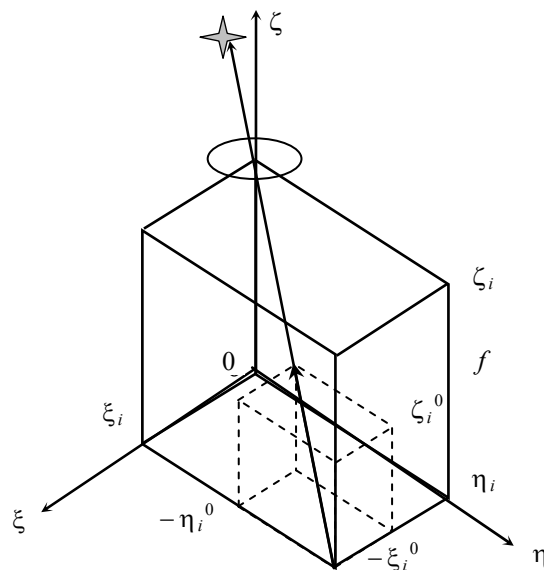


Рис. 1

Если  $\xi, \eta$  — измеренные координаты звезды в приборной системе координат (ПСК), то направляющие косинусы звезды в системе  $a(\xi^0, \eta^0, \zeta^0)$  определяются как  $\xi^0 = -\frac{\xi}{d}, \eta^0 = -\frac{\eta}{d}, \zeta^0 = -\frac{\zeta}{d}$ , где  $d = (\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2)$ ,  $f$  — фокусное расстояние ОЭП. По орту звезды в ПСК при жестком креплении ОЭП на корпусе КА под определенными углами рассчитывается орт звезды в связанной системе координат (ССК), а затем и в системе ТОСК [4].

**Алгоритм решения задачи ориентации космического аппарата.** Ориентация КА выполняется с учетом результатов углового движения вокруг центра масс системы координат, жестко связанной с корпусом КА.

В зависимости от решаемых КА задач базовой может быть текущая орбитальная, инерциальная или специальная система координат.

При этом различают задачи определения фактической ориентации для аппаратов, не ориентированных в пространстве (не имеющих системы стабилизации или включающих ее лишь эпизодически, или совершающих различные маневры в пространстве), и для аппаратов, имеющих определенную систему стабилизации (например, активную — силовую, или пассивную — магнитогравитационную), когда фактическая оценка ориентации сводится к уточнению с целью парирования погрешностей системы стабилизации.

Разработанный алгоритм основан на следующей идее. Определяются сглаженные за мерный интервал углы ориентации КА, на основе того же принципа, что и при уточнении орбиты (рассчитываются частные производные, но уже от измеряемых  $\xi_i, \eta_i$  по уточняемым углам ориентации  $\vartheta, \psi, \gamma$  — соответственно тангажу, рысканию и крену).

Предварительное распознавание рабочей звезды в каждом ОЭП, т.е. определение ортов этих звезд в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат, выполняется для различных законов угловых движений корпуса КА на мерном интервале. Подразумевается, что это движение может иметь либо постоянный характер, либо описываться линейной, квадратичной или синусоидальной функцией по каждой из осей. Зависимость углов ориентации  $q = (\vartheta, \psi, \gamma)$  от параметров динамики  $a_m$  в общем виде запишется как  $q = f(a_m)$ ,  $m = 0, \dots, 3$ .

Данный алгоритм реализован в АСНИ, он по аналогии с алгоритмом определения орбиты рассчитывает начальную градиентную матрицу  $G_{0i} = G_i \cdot \Phi_{0i}$ , где  $G_i$  — матрица чувствительности измерений для данного  $i$ ,  $\Phi_{0i}$  — матрица, отображающая параметры движения, в данном случае углы ориентации.

В отсутствие изменения этих углов  $\Phi_{0i} = E$  (единичная матрица). При наличии динамики элементы матрицы  $\Phi_{0i}$  будут частными производными по времени от функций динамики (т.е. от изменения погрешностей системы стабилизации КА).

Предложенный алгоритм позволяет получить отличающиеся коэффициенты опорных координат звезды (чтобы сформировать невязки) и матрицы градиентов измерений [4]. Структура имитационной модели системы автономного определения ориентации КА по алгоритму представлена на рис. 2.



Рис. 2

**Результаты моделирования системы ориентации.** При статистическом моделировании системы ориентации, проведенном в АСНИ для различных орбит КА, основное внимание было сосредоточено на орбитах геостационарных аппаратов с различными точками стояния. Результаты решения этих задач при характерных погрешностях измерений в ОЭП для различных ветвей алгоритма приведены в табл. 1; оценена ориентация: КА системы „Радиоастрон“ (табл. 2), КА с высокоэллиптическими наклонными (табл. 3) и высокоэллиптическими экваториальными орбитами (табл. 4). Всего получено 37 записей.

Моделируемые параметры орбит для геостационарных КА включали среднее квадратическое отклонение от известной опорной орбиты до 30 км в большой полуоси, до 10 — в точке стояния. Если для этих параметров предполагались сравнительно низкая точность ОЭП ориентации (порядка  $0,1''$ ) и большие погрешности активного режима ориентации, то гарантированная апостериорная погрешность оценивания орбиты не превышала 2,45 м, ориентации —  $6,1'$  (запись 849). В основном полученные результаты не превышали 1 м и десятков угловых минут при средней квадратической погрешности (СКП) навигационных ОЭП порядка  $0,01''$  (запись 825). В табл. 1 представлен результат применения алгоритма распознавания звезд при активном режиме (записи 814, 823, 826). В этих записях использованы два алгоритма распознавания звезд, зависящие от размера априорных знаний об ориентированности КА. При погрешностях  $\geq 5^\circ$  можно оценивать априорную способность области звезд, близких к опорному значению ориентации. Иначе нужно поиск вести по всему небосводу (расширенный метод распознавания) — что сделано для других орбит в решениях (805, 813, 823, 839, 843) табл. 2—4.

Из-за разницы в априорных значениях погрешностей ориентации (более чем в три раза) в решениях 814 и 823 используются различные методы распознавания звезд, и результаты их решений относительно близки к решению 826.

В решении 826, при изначальной ориентации на малую погрешность, использован локальный алгоритм распознавания звезд, в ходе решения линейная погрешность алгоритма ориентации привела к росту свыше  $5^\circ$ , что и нарушило условия использования алгоритма распознавания.

Запись 814 — пример высокой точности системы ориентации, но значительной погрешности навигации, 826 — наоборот, низкой точности оценки ориентации. В данных записях оценивается только относительность погрешностей, записи относятся к различным точкам стояния КА. Погрешности оценивания ориентации при пассивном режиме представлены в записях 829, 830.



Таблица 2

Оценки ориентации и навигации КА системы „Радиоастрон“

Число ОЭП	Погрешность ОЭП, ..."		Режим решения ориентации	Угловое движение								Результаты решений						Номер записи в базе решений	
	навигации	ориентации		постоянная составляющая, ...°	СКП, ..."	амплитуда, ...°	частота, ...°/с	фаза, ...°	линейный множитель, ...°/с	кварцевый множитель, ...°/с	алгоритм распознавания звезд	ориентация, ..."		гарантированная оценка		навигация			сглаженная оценка
												др, см	dv, мм/с	др, см	dv, мм/с	др, см	dv, мм/с		
2	0,01	0,1	A	3	-						Локал.	1,0	-13,0	0,44	6,37	7,87	2,8	2,4	799
3	0,01	0,1	A	3	-	0,01	0,002	0			Локал.	-103	-122	-92,4	9,1	8,4	2,7	2,3	801
3	0,01	0,1	A	3	-	0,1	0,2	0			Локал.	-566	-766	-791	5,21	11,2	2,5	2,4	803
3	0,01	0,1	A	10	-						Расшир.	-15,7	18,6	-8,6	3,55	3,51	1,5	1,5	805
3	0,01	0,1	A	5	-				3·10 <sup>-7</sup>		Локал.	554	764	89,6	7,1	4,5	2,6	1,8	810
3	0,01	0,1	A	3	-	3			1·10 <sup>-7</sup>		Локал.	572	773	91,8	6,53	6,7	2,4	2,1	812
3	0,01	0,1	A	5	-	5			3·10 <sup>-6</sup>		Расшир.	5,4·10 <sup>3</sup>	7,5·10 <sup>3</sup>	8,7·10 <sup>3</sup>	5,07	5,3	1,8	2,0	813
2	0,01	0,1	A	300	100						Локал.	-363	381	382	14,3	6,75	3,7	2,2	853
3	0,001	0,01	A	10	-						Расшир.	-10,6	16,7	-4,85	1,63	3,9	4,0	0,75	856
3	0,001	0,1	II	300	100						Локал.	428	504	415	756	3,93	260	1,03	983

Таблица 3

Оценки ориентации и навигации КА с сильно вытянутыми наклонными орбитами

Число ОЭП	Погрешность ОЭП, ..."		Режим решения ориентации	Угловое движение								Результаты решений						Номер записи в базе решений	
	навигации	ориентации		постоянная составляющая, ...°	СКП, ..."	амплитуда, ...°	частота, ...°/с	фаза, ...°	линейный множитель, ...°/с	кварцевый множитель, ...°/с	алгоритм распознавания звезд	ориентация, ..."		навигация		сглаженная оценка			
												др, см	dv, мм/с	др, см	dv, мм/с		др, см		dv, мм/с
3	0,01	0,1	A	3							Локал.	4,78	-12,9	3,96	0,78	3,6	0,31	1,5	831
3	0,01	0,1	A	3							Локал.	5,21	-11,9	4,31	0,51	3,5	0,29	1,6	834
3	0,01	0,1	A	3		0,01	0,02	10			Локал.	-68,1	-93,9	-63,8	1,76	8,4	0,56	3,0	835
3	0,01	0,1	A	3		0,1	0,02	10			Локал.	648	84	640	1,47	9,6	0,47	2,9	837
3	0,01	0,1	A	10							Расшир.	284	-401	172	1,07	7,1	0,33	2,1	838

Таблица 4

Оценки ориентации КА с сильно вытянутыми экваториальными орбитами

Число ОЭП	Погрешность ОЭП, ..."		Режим решения ориентации	Угловое движение								Результаты решений				Номер записи в базе Решений					
	навигации	ориентации		постоянная составляющая, ...°	СКП, ..."	амплитуда, ...°	частота, ...°/с	фаза, ...°	линейный множитель, ...°/с	квартичный множитель, ...°/с	алгоритм распознавания звезд	ориентация, ..."		навигация							
навигации	ориентации										$\vartheta$	$\psi$	$\gamma$	гарантированная оценка $dr$ , см	$dv$ , мм/с	гарантированная оценка $dr$ , см	$dv$ , мм/с	сглаженная оценка $dr$ , см	$dv$ , мм/с		
3	1	0,01	0,1	П	10	10						Локал.	Локал.	42,6	41,5	46,6	2,32	8,37	0,49	1,7	839
3	1	0,01	0,1	А	100	100						Локал.	Локал.	432	446	450	0,51	1,7	0,30	1,0	840
3	1	0,01	0,1	А	600	1000						Локал.	Локал.	4110	-4280	4400	1,17	3,5	0,35	1,1	841
3	1	0,1	0,1	А	600	1000						Локал.	Локал.	410	-4380	4400	14,2	43	3,9	10,0	842
3	1	0,01	0,1	А	10							Расшир.	Расшир.	226	-479	111	0,85	2,6	0,26	0,78	843
3	1	0,01	0,1	А	3		0,1	0,02	10			Локал.	Локал.	729	1040	817	0,54	1,5	0,21	0,06	844
3	1	0,01	0,1	А	3					$1 \cdot 10^{-5}$		Локал.	Локал.	-542	-593	-548	0,40	1,1	0,20	0,59	845
3	1	0,01	0,1	А						$1 \cdot 10^{-5}$	0,02	Локал.	Локал.	$3,1 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^7$	0,46	1,3	0,22	0,59	847
3	1	0,1	0,1	П	600	1000						Локал.	Локал.	$4,2 \cdot 10^3$	$-4,2 \cdot 10^3$	$-4,1 \cdot 10^3$	28,0	$10^5$	4,8	$-1,7 \cdot 10^6$	848

Орбита, представленная в табл. 2, предполагает использование интерферометра со сверхдлинной базой „Земля—Космос“, т.е. одна антенна находится на Земле, а другая в космосе, на борту КА, орбита которого определяется методом виртуальных измерений зенитных расстояний звезд с погрешностью порядка единиц метров при СКП навигационных ОЭП в  $0,01''$ , или около полутора метров при СКП навигационных ОЭП в  $0,001''$  (запись 856). Период обращения КА системы „Радиоастрон“ — порядка 6 месяцев и 21 дня, поэтому, чтобы можно было сравнивать различные записи, этот интервал от 21.5.2001 15 ч 58 мин 12 с до 1.10.2001 16 часов сохранялся для всех решений.

Для наклонных орбит (табл. 3) построен другой алгоритм набора статистики, когда последующее решение продолжало предыдущее, поэтому в записях 831 и 858—862 орбита непрерывно контролировалась при активном механизме ориентации в течение 5 месяцев, гарантированные оценки навигации сохранялись около 1,8 м, ориентации — порядка  $10'$ .

Поскольку при моделировании решение задач заключается в суммировании поправок с опорными значениями в процессе решения, точность оценивается путем сравнения опорных и истинных значений параметров в конце каждого решения. Максимум этих разностей представляется гарантированной апостериорной точностью модельного решения. Однако расчет по максимальным значениям приводит к завышению погрешности решений. Более корректно предварительное сглаживание каждого решения устранением максимума и последующее сглаживание полученной выборки на основе расчета среднего, среднеквадратического значения и применения известного правила „трех сигм“ [12].

**Вывод.** Анализ материалов исследований показал, что, несмотря на столь разные параметры просмотренных орбит, система ориентации может быть построена с использованием ОЭП, поскольку наблюдаются одинаковые зависимости: от точности измерителей навигационной функции, от точности реализации соответствующего механизма и поддержки ее алгоритмом, от точности распознавания соответствующих звезд.

Алгоритм системы ориентации работоспособен при одном или двух ОЭП. При этом ошибка измерений начальной точки опорной орбиты может достигать одновременно 30 км по оси орбиты и  $5^\circ$  по аргументу восходящего узла.

Автономная система навигации и ориентации, построенная на основе метода виртуальных измерений зенитных расстояний звезд, позволит решить ряд задач навигации и ориентации благодаря универсальности (применимости для любых околоземных орбит и орбит достижения других планет Солнечной системы), малым массогабаритным характеристикам измерителей, возможности пассивных измерений, устойчивости к возмущениям орбит, одновременному оцениванию орбиты и ориентации плоскости орбиты в пространстве на основе использования отдельных алгоритмов. Подобная система может являться своего рода стандартом для автономных систем навигации и ориентации различных классов КА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В. И., Смолицкий Х. Л., Данилова Т. В. Метод автономной астрономической навигации и ориентации ИСЗ // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 5—16.
2. Смолицкий Х. Л., Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Модель оптического построителя местной вертикали ИСЗ // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 5. С. 45—52.
3. Кузнецов В. И. Система автономного определения орбит космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 3—9.
4. Кузнецов В. И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. Ч. 1. 289 с.; Ч. 2. 164 с.



5. 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. 555—562.
6. Пат. 2454631 РФ, МПК G 01 C 21/02. Способ автономной навигации и ориентации космических аппаратов на основе виртуальных измерений зенитных расстояний звезд / В. И. Кузнецов, Т. В. Данилова, Д. М. Косулин. Заявл. 28.10.10. Оpubл. 27.06.12. Бюл. № 18.
7. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Теория и практика навигационного обеспечения применения ВС РФ. Ч. 2. Автономная астрономическая навигация и ориентация космических аппаратов. СПб: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2015. 233 с.
8. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автономная астрономическая система навигации и слежения // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58, № 8. С. 625—638.
9. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Многофункциональная астрономическая самоорганизующаяся система автономной навигации и ориентации искусственных спутников Земли // *Космические исследования*. 2017. Т. 55, № 2. С. 150—166.
10. Кузнецов В. И., Данилова Т. В., Архипова М. А. Основные результаты применения автоматизированной системы научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов // *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2018. Т. 10, № 1. С. 4—13.
11. Кузнецов В. И., Данилова Т. В., Архипова М. А. Астрономическая система автономной навигации и ориентации космических аппаратов широкого назначения // *Труды ИПА РАН*. 2018. Вып. 44. С. 75—82.
12. Кузнецов В. И., Калашиников С. Д., Миклин Д. В. Метод точностных характеристик системы автономной навигации и ориентации космических аппаратов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63, № 1. С. 35—44.
13. Кардашев Н. С., Крейсман Б. Б., Пономарев Ю. Н. Новая орбита и новые возможности проекта „Радиоастрон“ // *Труды ФИАН. Радиоастрономическая техника и методы*. Ч. 1. Космические проекты. М.: Наука, 2000. Т. 228. С. 3—16.
14. Кузнецов В. И. Обоснование метода решения задачи автономного определения параметров движения космических аппаратов на основе взаимной обработки результатов измерений пульсарных излучений // *Тр. ВКА*. 2019. № 667. С. 110—121.

#### *Сведения об авторах*

- Владислав Иванович Кузнецов** — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт (научно-исследовательский); ст. научный сотрудник
- Сергей Дмитриевич Калашиников** — ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт (научно-исследовательский); научный сотрудник;  
E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию  
24.02.2021 г.

**Ссылка для цитирования:** Кузнецов В. И., Калашиников С. Д. Применение метода виртуальных измерений зенитных расстояний звезд при решении задачи ориентации // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 4. С. 245—254.

#### **APPLICATION OF THE METHOD OF VIRTUAL MEASUREMENTS OF STARS ZENITH DISTANCES IN SOLVING THE ORIENTATION PROBLEM**

**V. I. Kuznetsov, S. D. Kalashnikov**

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia  
E-mail: vka@mil.ru*

Application of the method of virtual measurements of stars zenith distances of in spacecraft orientation system are considered, results of modeling the orientation system operation with various algorithms for solving navigation problems are presented. The problem of orientation is solved based on determining the orbit of the spacecraft using two charge-coupled optical-electronic devices (OEDs) installed in gimbal suspensions to be pointed at specially selected bright stars in the sky. The spacecraft orbit determined according to the information from the OEDs is used by the algorithm for solving the orientation problem. In-

formation from the third (possibly the fourth) OED rigidly connected to the spacecraft body is applied to determine parameters of the spacecraft body orientation in space using special mechanisms and algorithms of the least squares method for data averaged over a measuring interval.

**Keywords:** spacecraft autonomy, method of virtual measurements of stars zenith distances, spacecraft orientation system

#### REFERENCES

1. Kuznetsov V.I., Smolitskiy Kh.L., Danilova T.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2003, no. 4(46), pp. 5–16. (in Russ.)
2. Smolitskiy Kh.L., Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2005, no. 5(48), pp. 45–52. (in Russ.)
3. Kuznetsov V.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 5(51), pp. 3–9. (in Russ.)
4. Kuznetsov V.I. *Avtomatizirovannaya sistema nauchnykh issledovaniy metodov i algoritmov avtonomnoy navigatsii i oriyentatsii kosmicheskikh apparatov* (Automated System for Scientific Research of Methods and Algorithms for Autonomous Navigation and Orientation of Spacecraft), St. Petersburg, 2010. (in Russ.)
5. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Cosmic Research*, 2011, no. 6(49), pp. 538–545.
6. Patent RU2454631, G 01 C 21/02, *Sposob avtonomnoy navigatsii i oriyentatsii kosmicheskikh apparatov na osnove virtual'nykh izmereniy zenitnykh rasstoyaniy zvezd* (Method for Autonomous Navigation and Orientation of Spacecraft Based on Virtual Measurements of Stellar Zenith Distances), Kuznetsov V.I., Danilova T.V., Kosulin D.M. Priority 28.10.2010, Published 27.06.2012, Bulletin 18. (in Russ.)
7. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Teoriya i praktika navigatsionnogo obespecheniya, primeniya VS RF. Chast' 2 Avtonomnaya astronomicheskaya navigatsiya i oriyentatsii kosmicheskikh apparatov* (Theory and Practice of Navigational Support, the Use of the RF Armed Forces. Part 2 Autonomous Astronomical Navigation and Orientation of Spacecraft), St. Petersburg, 2015, 233 p. (in Russ.)
8. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 8(58), pp. 625–638. (in Russ.)
9. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Cosmic Research*, 2017, no. 2(55), pp. 142–158.
10. Kuznetsov V.I., Danilova T.V., Arkhipova M.A. *H&ES Research*, 2018, no. 1(10), pp. 6–14. (in Russ.)
11. Kuznetsov V.I., Danilova T.V., Arkhipova M.A., Maslova M.A. *Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2018, no. 44, pp. 75–82. (in Russ.)
12. Kuznetsov V.I., Kalashnikov S.D., Miklin D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 1(63), pp. 35–44. (in Russ.)
13. Kardashev N.S., Kreysman B.B., Ponomarev Yu.N. *Trudy FIAN. Radioastronomicheskaya tekhnika i metody. Ch. 1. Kosmicheskiye proyekty*, Moscow, 2000, vol. 228, pp. 3–16. (in Russ.)
14. Kuznetsov V.I. *Trudy VKA*, 2019, no. 667, pp.110–121. (in Russ.)

#### Data on authors

**Vladislav I. Kuznetsov**

— Dr. Sci.; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Senior Researcher

**Sergey D. Kalashnikov**

— A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Researcher; E-mail: vka@mil.ru

**For citation:** Kuznetsov V. I., Kalashnikov S. D. Application of the method of virtual measurements of stars zenith distances in solving the orientation problem. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 4. P. 245–254 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-4-245-254