

УДК 523.34:629.78:527.62

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТЫ И ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО ВИРТУАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ ЗВЕЗД

© 2022 г. В. И. Кузнецов¹, С. Д. Калашников¹, *, А. Н. Наговицына¹

¹Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

*vka@mil.ru

Поступила в редакцию 14.12.2021 г.

После доработки 11.03.2022 г.

Принята к публикации 04.05.2022 г.

Представлено описание нового метода автономной навигации для определения орбит и ориентации искусственных спутников земли, основанного на визировании оптико-электронными приборами выбранных звезд, по которым рассчитываются виртуальные зенитные углы звезд. Рассматриваются различные орбиты, к которым применяются эти измерения, а также решения задач навигации и ориентации искусственных спутников земли для навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС. Описывается возможность синхронизации шкал времени КА на основе приема сигналов пульсаров.

DOI: 10.31857/S0023420622060061

ВВЕДЕНИЕ

Метод автономной навигации и ориентации по виртуальным измерениям зенитных расстояний звезд (ВИЗРЗ) разработан в период 2000–2010 гг. Его характерные черты во многом определены тем, что предварительно в период 1990–2000 гг. была разработана на основе средств языка программирования Pascal специальная программная среда автоматизированной системы анализа и синтеза задач автономной навигации и ориентации КА [1–3].

Использование разработанной среды программирования позволило создать автоматизированную систему научных исследований (АСНИ). С ее помощью на основе статистического моделирования были оценены точности 14 методов автономной навигации и 4 методов автономной навигации и ориентации [3, С. 188–190].

Всего АСНИ содержит свыше 40 программ, для выполнения различных баллистических расчетов, дополнительно используемых в алгоритмах автономной навигации и ориентации. В настоящее время АСНИ представлена в виде программных комплексов, версии 1.1 и 2.0. В последней предусмотрена возможность программирования метода ВИЗРЗ с применением объектно-ориентированного языка.

В процессе исследований последовательно сравнивались уже существующие и разрабатываемые

методы и алгоритмы автономной навигации с точек зрения:

- применения методов расчета частных производных от измеряемых параметров по элементам опорной орбиты;
- уменьшения массогабаритных характеристик бортовой аппаратуры при использовании систем автономной ориентации и навигации;
- оценки возможных точностей решения задач навигации и ориентации.

Особенно обращалось внимание на скрытность и реализуемость предполагаемых измерений функций движения КА.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье рассмотрено решение двух задач:

1. Повышение уровня автономности функционирования КА, при использовании метода ВИЗРЗ;
2. Повышение точности автономных систем навигации и ориентации;
3. Проанализирована возможность коррекции бортовой шкалы времени КА на основе приема сигналов пульсара.

Для КА уровень автономности функционирования является одним из системных параметров, который определяет способность КА выполнять целевые задачи с заданным уровнем эффективно-

сти без связи с наземным комплексом управления (НКУ).

Для повышения уровня автономности функционирования КА необходимо передать часть функций управления и контроля на борт КА, что позволит снизить количества сеансов связи с НКУ.

Основными направлениями решения задачи повышения степени автономности КА являются:

1. Создание и расширение функций систем автономной навигации и ориентации (САНиО);
2. Разработка соответствующей бортовой информационно-вычислительной системы с развитым математическим обеспечением;
3. Создание в бортовом математическом обеспечении средств автоматического выполнения полетного задания (ПЗ) для автономной реализации последовательности полетных операций в течение заданного, достаточно продолжительного периода полета КА, ПЗ может вводиться в БКУ до старта КА и может быть скорректировано из НКУ;
4. Повышение точности коррекции бортовой шкалы времени.

Разработанные нами алгоритмы позволяют решить часть этих задач, метод ВИЗРЗ в сравнении с другими методами (зенитный, взаимный, относительный и др.), показал наилучшие результаты при моделировании [4, 5]. Он сочетает скрытность и простоту проведения измерений навигационной функции с высокой точностью решения навигационной задачи благодаря принципиально новому способу выбора ярких звезд небосвода, на основе которых решается навигационная задача в текущей орбитальной системе координат (ТОСК). Список выбираемых звезд представлен в табл. 1. В процессе исследований выяснилось, что для задач, решавшихся с использованием этого списка, всегда можно выбрать минимум две звезды, так чтобы одна из выбранных звезд была ближе всего к плоскости орбиты, а вторая ближе к перпендикуляру к этой плоскости.

Из теории автономной навигации известно, что при минимальном числе измерений оптимум оценок орбит достигается именно при таком относительном расположении вектора измерений [1].

Значение орт выбранных звезд в ТОСК истинной и опорной орбит близки даже при больших различиях в начальных геоцентрических точках опорной и истинной орбит, что определяет устойчивость решения задач навигации при больших погрешностях априорной информации об опорной орбите.

В результате удалось разработать устойчивый метод с простым линейным алгоритмом расчета навигации на основе измерения приборных координат выбранных звезд. Выяснилось, что такого рода измерения также приводят к решению, не

Таблица 1. Навигационные звезды, используемые в АСНИ

№ п/п	Название звезды	Звездная величина
1	Ахернар	0.45
2	Полярная звезда	1.97
3	Альдебаран	0.87
4	Ригель	0.18
5	Капелла	0.08
6	Бетельгейзе	0.45
7	Канопус	-0.62
8	Сириус	-1.44
9	Процион	0.40
10	Поллукс	1.16
11	Альфа Креста	0.77
12	Бета Креста	1.25
13	Спика	0.98
14	Агена	0.61
15	Арктур	-0.05
16	Толиман	-0.01
17	Антарес	1.06
18	Вега	0.03
19	Алтаир	0.76
20	Денеб	1.25
21	Фомальгаут	1.17

только задачи навигации, но и задачи ориентации в среднем за мерный интервал при использовании метода наименьших квадратов [6].

Из [4, 5] следует, что с одной стороны, этот метод не требует непосредственного точного построения местной вертикали, но с другой стороны он фактически реализует расчет зенитного угла звезды в ТОСК, поэтому он назван методом виртуальных измерений.

Моделирование системы автономной навигации и ориентации по виртуальным измерениям, при различных условиях автономного функционирования КА, прежде всего построения САНиО, и для различных видов орбитального движения, показало устойчивость метода, его универсальность и высокую точность [3, 7, 15, 16].

Метод предусматривает до 5 оптико-электронный приборов (ОЭП) с зарядовой связью, помещаемых в кардановые подвесы для визирования звезд и решения навигационной задачи. В статье их принято называть навигационными. Для решения задачи ориентации в пространстве, один из них может быть жестко закреплен на корпусе аппарата.

Оси система ТОСК в которой решается навигационная задача, располагают в направлении на

центр Земли (ось S) и в плоскости перпендикулярной оси S в направлении трансверсали и бинормалей (соответственно оси T и W) [1].

В АСНИ принято считать, что статистические условия решения задач соответствуют условиям придельной центральной теоремы, поэтому погрешности расчетов оценивались известной формулой:

$$\Delta_{ij} = abs(\Delta M_{ij}) + 3\sigma_j, \quad (1)$$

где M – параметры описания движения, ΔM – апостериорная оценка параметров M , i – номер итерации статистики, j – элемент параметра в M , σ – среднеквадратическое отклонение (СКО).

В начале под Δ_{ij} принимались лишь максимальные погрешности в каждой итерации, то есть в решении задачи на мерном интервале:

$$\Delta R_i = \sqrt{\Delta S_i^2 + \Delta T_i^2 + \Delta W_i^2}, \quad (2)$$

где ΔR – погрешность радиус-вектора орбиты.

Затем было замечено что часто максимальные погрешности, весьма редко появляющиеся в решениях итераций, значительно превалирует над их средним значением в итерации. Поэтому в дальнейшем оценивались и максимальные и средние значения, а также их СКО.

Заметим, что параметр S имеет относительно большой вес, с точки зрения конечной оценки точности навигации потребителем.

Для повышения точности оценок орбит виртуальным методом, был разработан алгоритм оптимальной стратегии измерений, строящейся на основе циклического слежения за выбранным в исходных данных оптимизируемым параметром из M . Чаще всего выбирался параметр с максимальной начальной дисперсией. Циклы рассчитывались на основе интерполяционных полиномов Лагранжа. Поскольку именно этот алгоритм определяет фактически моменты измерений, то очевидно точность решения задач целесообразно отождествлять оценками ΔR и ΔS в конце мерного интервала. Упомянутые далее точности визирования звезд, надо понимать как начальные значения для запуска решения задач.

Метод ВИЗРЗ может быть использован в системе ГЛОНАСС. В минимальном комплексе, навигационная задача решается на основе информации от двух навигационных ОЭП, а для решения задачи ориентации одного дополнительного ОЭП, жестко закрепленного на корпусе КА.

Отметим, что начальный алгоритм совершенствования системы ГЛОНАСС был представлен в [15, 16], однако моделирование показало, что он не удовлетворителен по точности оценок орбит и числа ОЭП, помещаемых в кардановые подвесы.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Система виртуальных измерений опирается на ранее исследованные темы:

- алгоритм интегрирования уравнений движения искусственного спутника земли (ИСЗ) с переменными правыми частями в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат с учетом гравитации Земли, воздействия атмосферы и влияния Солнца, Луны и других планет Солнечной системы [2, с. 90–110];

- алгоритм модернизированного метода наименьших квадратов (МНК) [3, с. 158–163];

- системы расчета оптимальных моментов измерений [3, с. 77–112];

- модель оптического построителя местной вертикали ИСЗ [17].

Метод используется различно в зависимости от внешних условий. Конечно, прежде всего он используется по прямому назначению как метод автономной навигации КА с классической структурой расчетов наподобие решения краевой задачи (задачи Коши) с неизменным заданием начальных параметров опорной и истинной траекторий. Важно, что допускается разность (погрешность) между начальными точками опорной и истинной орбит порядка нескольких сотен километров и пропорционально изменяющейся скорости. Например, при определении орбит КА первой плоскости ГЛОНАСС метод проверялся при заданной погрешности исходных данных в 500–1000 км [3, с. 163–169].

Дополнительно может решаться задача слежения за визируемыми КА, в том числе, автономное оценивание изменения их орбит с течением времени [10] и совершенствуется известный метод взаимной навигации КА [9]. В своем классическом виде метод взаимной навигации требует измерения дальности между космическими аппаратами, что значительно ухудшает качество данного метода. Использование метода ВИЗРЗ, позволяющего повысить точность оценок орбиты визирующего КА и увеличить число визируемых звезд, улучшает точность метода взаимной навигации и позволяет исключить измерение дальности.

Разработанный авторами и защищенный патентом метод автономного формирования предварительных оценок параметров орбиты на основе анализа годографов (массивов ортов) геоцентрических осей КА за виток полета и расчета оценок оскулирующих элементов орбиты, достаточен для использования в качестве опорных данных для точного решения навигационной задачи по методу виртуальных измерений зенитных расстояний звезд [12].

На основе этого алгоритма создана многофункциональная астрономическая самоорганизующаяся система [6], в которой используется

разработанный алгоритм построения на основе фактического движения КА по звездному полю моделей годографов осей аппарата на мерном интервале. Анализ годографов позволяет достаточно точно рассчитать большую полуось орбиты, наклонение ее плоскости, эксцентриситет, аргумент восходящего узла, но с большой погрешностью — аргумент перигея и истинную аномалию (несмотря на предпринятый циклический расчет этих параметров). Результат этого первичного расчета закладывается в качестве исходных данных для второго этапа расчета опорной орбиты КА, средствами метода ВИЗРЗ. Моделирование показало устойчивость двухэтапного решения, для любых орбит: геоцентрическая средневысокая — типа ГЛОНАСС, геостационарных, эллиптических орбит с большими эксцентриситетами и низких орбит порядка 300–1000 км.

Таким образом метод ВИЗРЗ приобрел не только характеристику системы широкого профиля [7, 13], но и на его основе ныне повышается точность многофункциональной самоорганизующейся системы (АСНИ 2.0), с учетом дальнейшего совершенствования характеристик алгоритма оптимальной стратегии измерений.

По материалам разработки метода защищены две кандидатские диссертации.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ МЕТОДА НАВИГАЦИИ

В версии АСНИ 1.1, в основном используются единичные или статистические расчеты. Как правило единичные решения применялись при разработке нового метода навигации или ориентации, особенно когда нужно определить чувствительность алгоритма и скрытность измерений. Статистика использовалась уже после, когда принимались решения согласно выбранной тактике, отвечающей задуманному алгоритму решения задач и для определенного мерного интервала. В статистический набор может входить до 35 итераций (решений), все они заканчиваются статистической информацией о принятых параметрах описания статистик. Этот набор представляет собой пронумерованную запись базы решений при моделировании данного метода и всю исходную информацию, позволяющую повторить решение.

Начальный анализ при погрешности определения приборных координат звезды в 0.1 угловой секунды показал различные точности орбиты для навигационных космических аппаратов (НКА) в зависимости от нахождения их в одной из трех плоскостей системы ГЛОНАСС. Было определено, что наихудшие оценки устойчиво получаются для НКА первой плоскости системы, аргумент восходящего узла равен 0 [3, С. 163–170]. Поэтому в дальнейшем при погрешности приборных коор-

динат звезды порядка 0.01 угловой секунды были проведены исследования системы именно начиная с НКА первой плоскости [14]. Для аппаратов этой плоскости был определен и конкретный алгоритм из системы определения оптимальных моментов измерений [3, С. 77–112].

При трех навигационных ОЭП с погрешностью в 0.01 угловых секунд точности вероятностных оценок параметров орбит НКА системы ГЛОНАСС могут быть согласно (1, 2) около [15, 16]:

- 34.3 см по радиусу-вектору орбиты;
- 65 см по геоцентрическому положению;
- 0.09 см/с по модулю геоцентрической скорости.

Такую точность эфемерид 1-го рода система способна поддерживать на длительных промежутках времени, не опираясь на НКУ.

Приведенные параметры определены при отсутствии систематических погрешностей во всех частях звездного датчика и для случая медленного вращения КА, при котором смазывание изображения звезды за время экспозиции не превышает одного пикселя и практически не сказывается на погрешности определения ориентации.

Хотя известно, что при линейном алгоритме расчетов точность решения навигационной задачи зависит от отношений среднеквадратических погрешностей измерений, было проведено моделирование орбитального сегмента системы ГЛОНАСС, при погрешности измерений в ОЭП равной 0.001 угловой секунды. Подтвердилась корректность алгоритма решения навигационной задачи, и окончательно определилось минимально возможное число навигационных ОЭП для этой точности измерений.

Табл. 2, 3 и 4 содержат информацию о погрешностях апостериорных оценок определения орбит для все НКА системы ГЛОНАСС. Эти оценки сделаны в геоцентрической инерциальной экваториальной системе координат как для максимальных значений статистики так и для средних значений в итерациях набора статистики. Каждая итерация предусматривала 500 измерений на выбранном мерном интервале в один виток. Измерения моделировались на трех ОЭП, два из которых навигационные. Полагалось начальная погрешность визирования в 0.001 угловых секунд (табл. 2).

АНАЛИЗ КОРРЕКЦИИ БОРТОВОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ

Использование системы виртуальных измерений, на основе приема сигналов пульсаров, позволит системе ГЛОНАСС решать задачу синхронизации временных шкал НКА. Дело в том, что задача ориентации реализована программно для двух алгоритмов — активного и пассивного [15]. Активный алгоритм предусматривает использо-

Таблица 2. Максимальные погрешности оценок орбит НКА первой плоскости системы ГЛОНАСС

№ п/п	Начальные истинные аномалии КА, град	№ записи в БД	Погрешности оценок орбит			
			ΔR_{\max} , см	$\sigma \Delta R_{\max}$, см	ΔS_{\max} , см	$\sigma \Delta S_{\max}$, см
1	15	911	8.5	1.2	3.1	4.9
2	60	912	8.6	1.2	4.7	2.9
3	105	913	12.3	1.2	8.4	3.4
4	150	914	20.9	2.4	6.0	1.4
5	195	907	33.8	2.5	10.5	7.0
6	240	908	22.4	2.5	9.1	6.9
7	285	909	32.6	2.3	7.9	4.7
8	330	910	9.5	1.5	3.2	3.9

Таблица 3. Максимальные погрешности оценок орбит НКА второй и третьей плоскости системы ГЛОНАСС

№ п/п	Начальные истинные аномалии КА	№ записи в БД	Погрешности оценок орбит				Примечание
			ΔR_{\max} , см	$\sigma \Delta R_{\max}$, см	ΔS_{\max} , см	$\sigma \Delta S_{\max}$, см	
1	0	939/947	6.35/6.28	7.7/8.2	2.97/2.69	2.52/2.5	В числителях погрешности оценок орбит НКА второй плоскости, в знаменателях третьей плоскости
2	45	940/948	11.1/0.6	8.2/0.9	5.19/4.7	2.94/4.6	
3	90	941/949	4.67/6.65	0.1/9.0	2.28/3.89	0.5/0.1	
4	135	942/950	5.1/5.5	7.0/7.8	2.46/2.22	2.4/2.2	
5	180	943/951	7.39/10.9	7.40/10	3.62/3.74	2.5/2.8	
6	225	944/952	6.5/10.7	7.1/9.3	3.11/2.98	2.0/1.7	
7	270	945/953	5.6/8.1	1.9/1.7	2.81/3.0	0.5/0.6	
8	315	946/954	4.9/5.4	6.7/7.7	2.3/6.0	1.8/1.3	

Таблица 4. Усредненные погрешности оценок всех орбит НКА системы ГЛОНАСС

Первая плоскость		Вторая плоскость		Третья плоскость	
$\Delta R_{\text{сред}}$, см	$\sigma_{\text{сред}}$, см	$\Delta R_{\text{сред}}$, см	$\sigma_{\text{сред}}$, см	$\Delta R_{\text{сред}}$, см	$\sigma_{\text{сред}}$, см
3.5	1.7	2.9	0.74	3.1	0.9
3.2	1.8	11.1	1.1	5.2	0.9
4.0	1.8	4.67	0.7	3.6	1.0
6.3	2.3	5.08	0.7	3.0	0.9
6.9	2.5	7.39	0.8	4.1	1.2
6.6	2.5	6.55	0.9	3.9	1.0
5.9	2.2	5.66	0.8	3.4	1.0
3.1	1.8	4.93	0.7	2.7	0.8

вание силовой гироскопической системы стабилизации КА, строящей систему ТОСК, например совместно с [17]. Пассивный алгоритм предусматривает наличие конструктивного дополнения к корпусу НКА в виде отдельного блока (антенны, принимающей сигналы пульсара), вынесенного за корпус аппарата, образующего так называемую “гантель”. КА под действием

магнитных и гравитационных сил на орбите разворачивает одну ось приблизительно в направлении местной вертикали.

Точности оценок параметров и ориентации при пассивном методе представлены на рис. 1. Расчеты проводились при систематической погрешности механизма ориентации в 300 угловых секунд и различных значениях среднеквадрати-

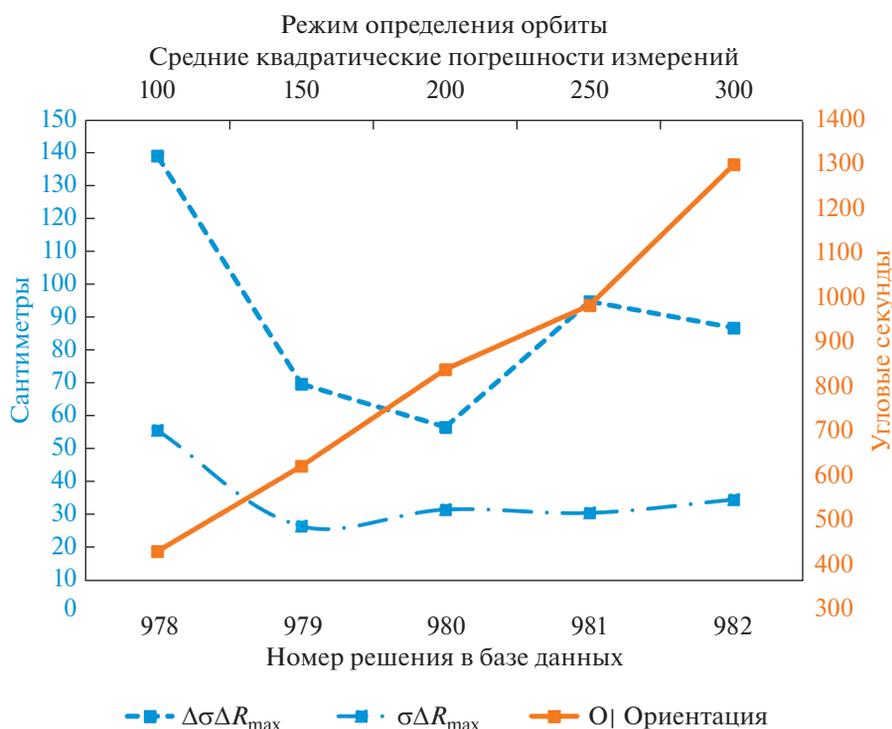


Рис. 1. Погрешности навигации и ориентации КА при пассивном методе ориентации.

ческих погрешностей. Из рис. 1 следует изменения точности ориентации (кривые ΔR_{\max} , $\sigma\Delta R_{\max}$) при максимальных колебаниях виртуальной местной вертикали от 0 (точка 0/0 на графике) до 0.3 градусов и устойчивость вероятностных оценок в этих пределах.

Пассивный алгоритм, несмотря на определенную сложность конструкции, благодаря применению сглаживающего влияния алгоритма МНК способен решать задачу ориентации с меньшей требовательностью к погрешностям измерений, чем алгоритм автономной навигации. Если в этих условиях дополнительно использовать алгоритм оптического построителя местной вертикали [17], то погрешность решения задачи ориентации значительно уменьшится.

С точки зрения непосредственного решения задачи синхронизации шкал времени КА отметим, что последние разработки применения теории относительности в радиоастрономических наблюдениях позволили считать точность синхронизации в 10 нс [23].

Известно, что до недавнего времени релятивистская трактовка астрономических наблюдений ограничивалась лишь учетом постньютоновских поправок в статическом сферическо-симметричном гравитационном поле Солнца. Современные наблюдения учитывают более тонкие релятивистские эффекты, обусловленные постньютоновскими поправками от гравитационного поля

Солнца и постньютоновскими возмущениями от планет, а также отклонениями от стационарности и сферической симметрии суммарного гравитационного поля солнечной системы, увеличили возможную оценку точности астрономических расчетов до современного значения [18–22].

Однако в проблеме реального построения системы синхронизации шкал времени КА в космосе еще много неопределенностей, касающихся построения соответствующей антенны и частоты принимающихся сигналов. Пока сигналы пульсаров принимаются на большие наземные антенны или системы антенн диаметром порядка 30–60 м и на частоте сотен мегагерц. Хотя многие интересующие нас миллисекундные пульсары излучают практически во всем диапазоне частот, от радиосигналов до рентгеновских. Для космоса возможно принимать сигналы учитывая, что рентгеновская аппаратура откликается на любой фотон любого диапазона со 100% гарантией. Построением кросс-корреляции между измеряемым средним импульсом в радиодиапазоне и появлением фотона или фотонов определенной энергии удастся уточнить время прихода среднего импульса. Необходимо изучение рентгеновских сигналов определенного миллисекундного пульсара, например пульсара В1937+214. Можно отметить, что разработан новый подход к проблеме повышения точности системы синхронизации шкалы времени КА [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение нового метода решения задач автономной навигации и ориентации КА — метода виртуальных измерений зенитных расстояний звезд, показало его эффективность при решении ряда задач автономного позиционирования КА и сложных систем КА, в том числе и в вопросе совершенствования системы ГЛОНАСС.

Метод ВИЗРЗ совместно решает задачи автономной навигации и ориентации КА на основе одинаковых измеряемых параметров — приборных координат ярких звезд и оригинальных алгоритмов решения собственных задач навигации и ориентации. Основные достоинства метода: простота линейного алгоритма расчета, скрытность измерений и точность решений задач навигации и ориентации.

Моделирование метода ВИЗРЗ применительно к системе ГЛОНАСС показало, что точность автономных оценок параметров орбит всех НКА, при условии использования современных приборов звездной ориентации [25], может достичь порядка 0.1–10 м. Поэтому целесообразно продолжить совершенствование метода, с точки зрения применимости его в системе ГЛОНАСС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порфирьев Л.Ф., Смирнов В.В., Кузнецов В.И. Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит. М.: Машиностроение, 1987.
2. Кузнецов В.И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010.
3. Кузнецов В.И., Данилова Т.В. Теория и практика навигационного обеспечения применения ВС РФ. Часть 2. Автономная астрономическая навигация и ориентация космических аппаратов: монография. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015.
4. Кузнецов В.И., Данилова Т.В. Система автономной навигации и ориентации ИСЗ, основанная на виртуальных измерениях зенитных расстояний звезд // Космич. исслед. 2011. Т. 49. № 6. С. 555–562.
5. Пат. 2454631 РФ, МПК G 01 C 21/02. Способ автономной навигации и ориентации космических аппаратов на основе виртуальных измерений зенитных расстояний звезд / Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Косулин Д.М.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского; заявл. 28.10.10; опубл. 27.06.12.
6. Кузнецов В.И., Данилова Т.В. Многофункциональная астрономическая самоорганизующаяся система автономной навигации и ориентации искусственных спутников Земли // Космич. исслед. 2017. Т. 55. № 2. С. 150–166.
7. 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 // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. Вып. 1. С. 4–13.
8. Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Архипова М.А. Автономный метод определения оценок параметров орбиты и ориентации космического аппарата при отсутствии априорной информации. Труды шестой Всероссийской конференции “Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение” (КВНО-2015). Труды Института прикладной астрономии РАН. Вып. 38. СПб.: ИПА РАН, 2016.
9. Кузнецов В.И., Данилова Т.В. Автономная астрономическая система навигации и слежения // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 8. С. 625–638.
10. Пат. 2624408 РФ, МПК G 01 C 21/24. Способ автономного оценивания изменений орбиты визируемого космического аппарата / Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Архипова М.А.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского; заявл. 01.12.15; опубл. 03.07.17.
11. Кузнецов В.И. Система автономного определения орбит космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем // Известия вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 5. С. 3–9.
12. Пат. 2542599 РФ, МПК G 01 C 21/02. Способ автономного определения орбиты и ориентации корпуса космического аппарата в пространстве при отсутствии априорной информации / Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Косулин Д.М., Архипова М.А.; заявитель и патентообладатель ВКА имени А.Ф. Можайского; заявл. 18.06.13; опубл. 20.02.2015.
13. Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Архипова М.А., Маслова М.А. Астрономическая система автономной навигации и ориентации космических аппаратов широкого назначения. Труды седьмой Всероссийской конференции “Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение”. ИПА РАН, 2018.
14. Кузнецов В.И., Данилова Т.В. Многофункциональная астрономическая самоорганизующаяся система автономной навигации и ориентации искусственных спутников Земли // Космич. исслед. 2017. Т. 55. № 2. С. 150–166.
15. Кузнецов В.И., Калашиников С.Д., Миклин Д.В. Метод точностных характеристик системы автономной навигации и ориентации космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 1. С. 35–44.
16. Кузнецов В.И., Калашиников С.Д. Применение метода виртуальных измерений зенитных расстояний звезд при решении задачи ориентации // Известия вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 4. С. 245–254.
17. Смолицкий Х.Л., Кузнецов В.И., Данилова Т.В. Модель оптического построителя местной вертикали ИСЗ // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 5. С. 45–52.

18. *Копейкин С.М.* Релятивистские системы отсчета в солнечной системе // *Астрономический журн.* 1989. Т. 66. Вып. 5. С. 1089.
19. *Копейкин С.М.* Асимптотические сшивки гравитационных полей в Солнечной системе // *Астрономический журнал.* 1989. Т. 66. Вып. 6. С. 1289–1295.
20. *Копейкин С.М.* Теория относительности в радиокосмических наблюдениях // *Астрономический журн.* 1990. Т. 66. Вып. 6. С. 1289–1295.
21. *Копейкин С.М.* О методе решения внешней и внутренней задачи в проблеме движения тел в ОТО // *Сборник трудов ГАИШ.* 1988. Т. 59. С. 53–65.
22. *Брумберг В.А., Копейкин С.М.* Релятивистские уравнения движения спутника Земли в геоцентрической системе отсчета // *Кинематика и физика небесных тел.* 1988. Т. 5. Вып. 1. С. 3–8.
23. *Дорошенко О.В., Копейкин С.М.* Алгоритм высокоточного фазового анализа наблюдений одиночных пульсаров // *Астрономический журн.* 1990. Т. 67. Вып. 5. С. 986–998.
24. *Кузнецов В.И.* Обоснование метода решения задачи автономного определения параметров движения космических аппаратов на основе взаимной обработки результатов измерений пульсарных излучений // *Труды ВКА.* 2019. № 667. С. 110–121.
25. *Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Деметьев В.Ю.* Результаты отработки программного обеспечения прибора звездной ориентации БОКЗ-М60/1000 на стенде динамических испытаний / Под ред. Аванесова Г.А. // *Сборник трудов Третьей Всероссийской научно-технической конференции “Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов”.* М.: ИКИ РАН, 2013.
26. *Аким Э.Л., Энеев Т.М.* Определение параметров движения космического летательного аппарата по данным траекторных измерений // *Космич. исслед.,* 1963. Т. 1. Вып. 1. С. 5–50.
27. *Eneev T.M., Ivashkin V.V., Sharov V.A., Bagdasaryan Ju.V.* Space Autonomous Navigation System of Soviet Project for Manned Fly By Moon // *Acta Astronautica.* 2010. V. 66. P. 341–347.
28. *Ивашкин В.В., Задыхина Л.И.* Анализ спутниковой автономной навигации при визировании неизвестных наземных ориентиров // *Космич. исслед.* 1988. Т. 26. Вып. 5. С. 680–698.