

Труды МАИ. 2021. № 121
Trudy MAI, 2021, no. 121

Научная статья

УДК 629.78:621.382.2

DOI: [10.34759/trd-2021-121-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-15)

КОНЦЕПЦИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ СВЯЗАННОЙ СИСТЕМЫ БОРТОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ДУГОМЕРА-ИНТЕРФЕРОМЕТРА И ОПТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ МАЯКОВ

**Людмила Витальевна Вернигора^{✉1}, Валентин Константинович Сысоев²,
Павел Владимирович Казмерчук³, Андрей Олегович Дмитриев⁴**

^{1,2,3,4}Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина,
Химки, Московская область, Россия

¹vlv@laspace.ru[✉]

²sysoev@laspace.ru

³pavel.kazmerchuk@gmail.com

⁴dao@laspace.ru

Аннотация. Поскольку переход на субмиллисекундный уровень точности оптических угломерных измерений в космосе в ближайшее время является неизбежным, а совместное использования космического оптического дугомера-интерферометра и оптических лазерных маяков позволит существенно повысить точность измерения снабженных маяками космических аппаратов (КА). Малые массо-габаритные характеристики маяков и их невысокое энергопотребление

позволяют дооснащать уже готовые к запуску аппараты оптическими маяками, не выходя за пределы экономии массы конструкции КА [1-5].

Проектируемый космический оптический дугомер-интерферометр «ЛИДА» способен достигать точности определения координат КА, снабженных оптическими маяками, почти на четыре порядка выше, чем достигается в настоящее время при контроле околоземного космического пространства (ОКП). Наблюдение космическим оптическим дугомером-интерферометром КА системы ГЛОНАСС, при условии оснащения их оптическими лазерными маяками, позволит повысить точность определения координат КА этой группировки до сантиметрового уровня (или даже лучше). Измерения угловых положений КА, имеющих бортовой оптический маяк, с помощью космического оптического дугомера-интерферометра приведут к ошибкам по положению в тангенциальном направлении даже на дальностях 1 млн. км, не превышающим размеров КА, что может представлять интерес для фундаментальной науки, - например, для уточнения величины гравитационной постоянной и масштабов Солнечной системы.

Ключевые слова: космический аппарат, космический интерферометр, оптические маяки, высокоточные измерения

Для цитирования: Вернигора Л.В., Сысоев В.К., Казмерчук П.В., Дмитриев А.О.

Концепция высокоточных траекторных измерений с помощью связанной системы бортового оптического дугомера-интерферометра и оптических лазерных маяков //

Труды МАИ. 2021. № 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-15)

THE CONCEPT OF HIGH-PRECISION TRAJECTORY MEASUREMENTS USING A COUPLED SYSTEM OF AN ONBOARD OPTICAL ARC METER-INTERFEROMETER AND OPTICAL LASER BEACONS

Lyudmila V. Vernigora^{1✉}, Valentin K. Sysoev², Pavel V. Kazmerchuk³,
Andrei O. Dmitriev⁴

^{1,2,3,4}Lavochkin Research and Production Association, NPO Lavochkin,
Khimki, Moscow region, Russia

¹ylv@laspacespace.ru✉

²sysoev@laspacespace.ru

³pavel.kazmerchuk@gmail.com

⁴dao@laspacespace.ru

Abstract. As far as the transition to a submillisecond accuracy level of optical angle measurements in space is inevitable in the near future, and the joint use of an onboard space optical arc meter-interferometer and optical laser beacons will significantly increase the accuracy of measuring spacecraft equipped with beacons. The small mass-and-size characteristics of beacons and their low energy consumption allow retrofitting the devices already prepared for launch with optical laser beacons, without going beyond the limits of the spacecraft design mass saving.

A simplified version of the “OSIRIS” astrometric arc meter-interferometer of the microsecond accuracy level - the LIDA device for applied use is capable of achieving the accuracy of coordinates determining of the spacecraft equipped with optical laser beacons,

almost four orders of magnitude higher than is currently achieved when near-Earth space monitoring. The LIDA arc meter-interferometer can be placed onboard a small spacecraft or be a passing load. GLONASS spacecraft observation by a space optical arc meter-interferometer of, provided they are equipped with optical laser beacons, will allow increasing coordinates accuracy determining of the spacecraft of this grouping to a centimeter level (or even better).

Spatial position measuring of a spacecraft in the interplanetary space is extremely important for correcting the spacecraft trajectory during interplanetary missions. Until now, there are still no autonomous navigation systems of this level. In search of an acceptable solution to this problem, the Americans are even making attempts to develop navigation principles for measuring pulsed radio emission of pulsars. Angular positions measurements of the spacecraft with the onboard optical laser beacon by a space optical arc meter-interferometer will lead to the errors by the position in the tangential direction even at the distances of one million kilometers, not exceeding the size of the spacecraft. These capabilities are unlikely to be in demand in the decades to come for practical navigation. However, they may be of interest to fundamental science, for example, to clarify the gravitational constant magnitude and the scale of the Solar System.

Keywords: spacecraft, space interferometer, optical beacons, high-precision measurements

For citation: Vernigora L.V., Sysoev V.K., Kazmerchuk P.V., Dmitriev A.O. The concept of high-precision trajectory measurements using a coupled system of an onboard optical arc meter-interferometer and optical laser beacons. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-15)

Введение

Навигация КА всегда являлась важной проблемой при запуске научных миссий. В ближнем (околоземном) пространстве измерение параметров орбит возложено на наземные измерительные средства [6-9]. Эшелон орбит с высотой менее 5000 км проводится средствами радиолокационного контроля. Поскольку радиолокация не имеет погодных ограничений, «нижние» орбиты контролируются круглосуточно, что позволяет поддерживать каталог контролируемых орбит с достаточной для практических целей точностью. КА на высокоэллиптических орбитах, полусуточные и геостационарные находятся вне зоны достижимости патрульных радиолокационных станций, и их приходится контролировать оптическими средствами [10]. Серьезные ограничения погодными условиями [11] и отсутствие у России оптических наблюдательных средств в южном полушарии Земли вынуждают обновлять данные каталога контролируемых высокоорбитальных объектов каждый квартал. Продолжительность этого периода связана с тем, что проводимые измерения положений КА астрономическими методами приводят к ошибкам в определении орбитальных параметров и соответствующему накоплению ошибок прогнозов положений КА, превышающих допустимые значения, примерно в течение полугода.

Астрометрическая практика показывает, что предельная точность угловых положений ярких светил (ярче $+6m$) при наземных наблюдениях может достигать до $0,01''$. Все контролируемые оптическими средствами объекты имеют яркость в тысячи раз меньше, и их наблюдение часто возможно только при эфемеридном отслеживании космических объектов (КО) и применении больших времен накопления оптического сигнала. Кроме того, все КО имеют большое видимое

движение относительно опорных звезд, что также ограничивает достижимую точность позиционных измерений. Как правило, точность измерений координат КО в околоземном пространстве находится вблизи величины 1"...2", и лишь в отдельных специализированных пунктах наблюдений она может достигать до 0,3".

Достижимая при оптических наблюдениях точность угловых положений может быть пояснена таблицей 1, в которой приведены эквиваленты точности положений КА по положению на круговой орбите с разной высотой.

Таблица 1.

Эквиваленты точности положений КА на круговой орбите

Высота орбиты, км	Точность 2"	Точность 0,3"
5000	50 м	7 м
10000	100 м	15 м
20000	200 м	30 м
40000	400 м	60 м
100000	1000 м	150 м

Если учесть, что КО на низких околоземных орбитах движутся с характерной скоростью 8 км/с, то, время, за которое КО пройдет расстояние, равное ошибке по положению на орбите, составляет доли микросекунды, так что можно утверждать, что оптические измерения положений КА имеют очень высокую точность. С другой стороны, продолжительность единичного измерения астрономическими приборами

составляет от 0,04 сек до нескольких сек., поэтому результаты измерений относятся к среднему положению КА во время измерений, а оно определяется точностью временных засечек при проведении наблюдений. Как правило, точность привязки измерений к шкале всемирного времени не превышает 1 мсек.

Вместе с тем требования к навигации КА постоянно растут, особенно в связи с ростом засорения ОКП элементами космического мусора и увеличением риска столкновений КА с ними [12].

Уровень достижимой точности угловых измерений в оптике

Улучшение точности измерения орбитальных параметров часто достигается измерением дальности до КА (в соответствии с Третьим законом Кеплера). Радиолокация для низких искусственных спутников Земли обеспечивает измерение дальности с точностью порядка метра, а оптическая (лазерная) локация уже вышла на сантиметровый уровень точности. В то же время никакая локация не обеспечивает измерений положений КА в тангенциальном направлении; получается интересная ситуация: точность по дальности может достигать до сантиметра, но при этом точность по положению в ортогональном лучу зрения направлении может составлять десятки и сотни метров.

Существует возможность повышения угловой точности измерений положений КА путем их наблюдений радиоинтерферометрами [13,14]. Радиоинтерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ) могут обеспечить угловую точность измерений до 0,001"...0,0001". Такая точность уже близка к достигнутой точности по дальности. Однако, РСДБ является очень сложной и очень дорогой техникой, и для наблюдений

КА используется крайне редко. Можно однозначно утверждать, что РСДБ никогда не войдут в состав штатных средств контроля космического пространства наравне с оптическими и радио-средствами.

Вместе с тем существует неиспользуемый до сих пор потенциал оптической интерферометрии для измерений положений КА. Космический оптический дугомер представляет собой двухбазовый интерферометр Майкельсона с совмещенными базами. Проект такого космического оптического интерферометра развивался в ИНАСАН под руководством А.В. Багрова. Технические решения, полученные при разработке такого проекта, позволяют надеяться на его успешную реализацию [15]. Основной оригинальностью решения такого интерферометра является совмещение баз, что обеспечивает возможность измерений дуги между светилами без измерения ориентации баз с такой же высокой точностью (рис. 1).

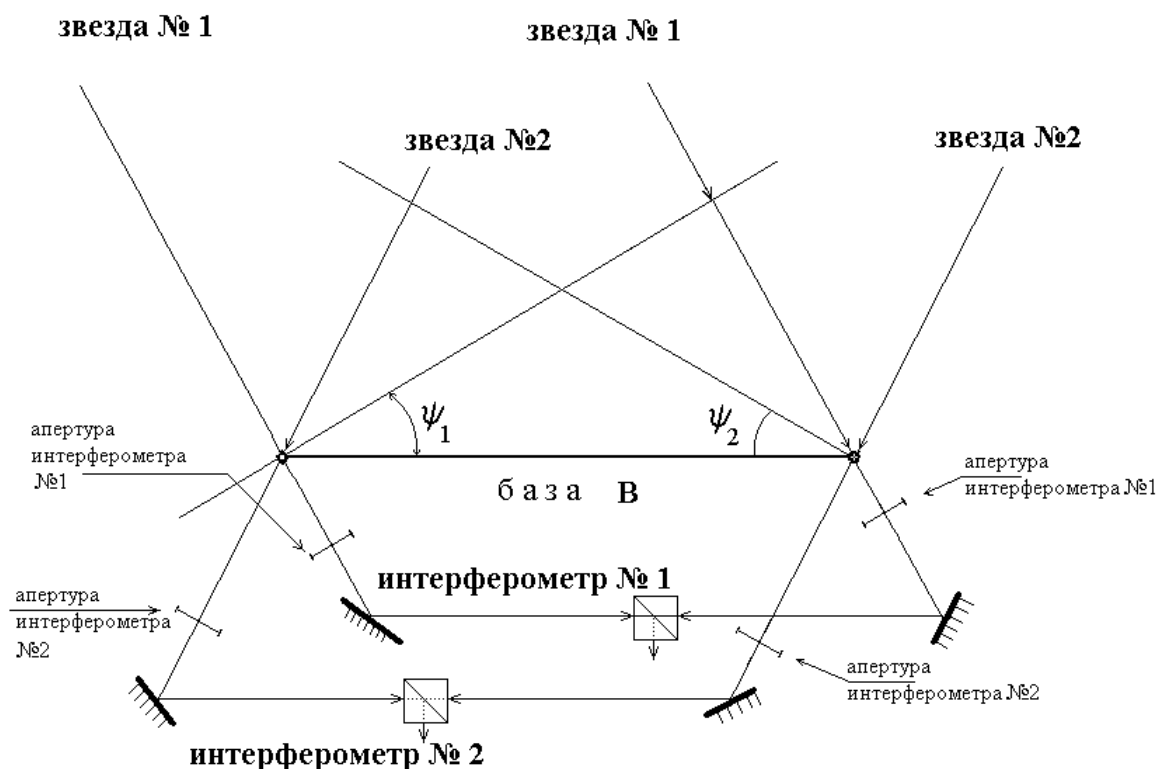


Рисунок 1. Концепция двухбазового оптического дугомера-интерферометра

В таком варианте угол между направлениями на звезду №1 и на звезду №2 равен сумме углов между плоскостями волновых фронтов от этих двух звезд и направлением линии базы (углов Ψ_1 и Ψ_2 на рисунке 1), независимо от того, как в момент измерения ориентирована база. Каждый из углов вычисляется по гипотенузе прямоугольного треугольника, которым является база интерферометра, и по его катету, равному оптической разности хода между волновым фронтом и концами базы.

В АО «НПО Лавочкина» совместно с ИНАСАН был проработан упрощенный вариант астрометрического дугомера-интерферометра микросекундного уровня точности "ОЗИРИС" – прибор "ЛИДА" для прикладного применения [16,17], который рассчитан на достижение точности единичных позиционных измерений в $0,0001''$, то есть почти на четыре порядка выше, чем достигается в настоящее время при контроле ОКП.

Интерферометр-дугомер "ЛИДА" может быть размещен на борту малого космического аппарата или являться попутной нагрузкой (рис. 2). Он может быть выведен на околоземную орбиту РН среднего класса.

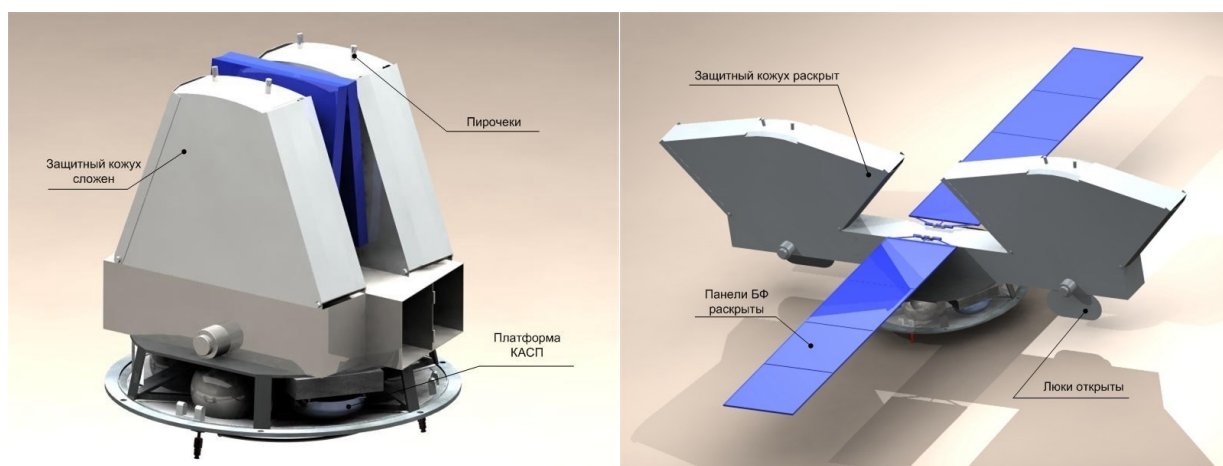


Рисунок 2. Вариант интерферометра-дугомера "ЛИДА" на малом КА [16,17]

Если бы контроль орбитальных параметров навигационных систем «ГЛОНАСС» [18,19], при условии снабжения их оптическими маяками [1-5], проводился космическим оптическим дугомером-интерферометром, то пространственное положение отдельных КА этой группировки можно было бы иметь с точностью до единиц сантиметров (или даже лучше). Это привело бы к повышению точности определения местоположения навигаторов «ГЛОНАСС» до сантиметрового уровня.

Обеспечение связи между фотометрическим центром КА и центром его масс

Следует подчеркнуть, что получение угловых положений с предельно высокой точностью из прямых наблюдений КА может привести к незначительному улучшению определяемых орбитальных параметров КА. Дело в том, что КА имеют, как правило, очень сложную форму, а рассеивание солнечного света разными элементами поверхности описывается индикатрисами рассеяния, зависящими от множества параметров (в т.ч. углом освещения, углом визирования, длиной световой волны, затенениями и т.д.). В результате направление на центр светового потока от КА и направление на его центр масс могут различаться на десятки сантиметров. Поэтому для высокоточных измерений угловых положений КА рационально использовать бортовые оптические маяки с малоразмерным телом свечения [1-5].

Бортовой оптический маяк может быть размещен в любой точке поверхности КА, поскольку точное смещение источника света относительно центра масс КА может быть измерено еще перед запуском аппарата в космос. Бортовые звездные

датчики имеют точность определения ориентации КА лучше 1° (как правило, она составляет $6''$) [20,21], поэтому расчетное отклонение между направлениями на маяк и на центр масс КА всегда будет лежать в пределах 1 мм.

Таблица 2.

Оценки измерений угловых положений КА, имеющих бортовой оптический маяк

Дальность до КА, тыс.км	Точность 0,001''	Точность 0,0001''
50	25 см	2,5 см
100	50 см	5,0 см
200	100 см	10 см
400	200 см	20 см
1000	500 см	50 см
10000	50 м	5 м

Траекторные измерения на околоземных орбитах

Известно, что подавляющее число элементов космического мусора (КМ) в ОКП составляют неуправляемые (вышедшие из строя) КА или их фрагменты. Для контроля параметров движения таких элементов КМ было бы полезно размещать на всех разделяемых при запусках частях КА автономные оптические маяки с большим сроком службы. Сейчас это позволило бы повысить точность прогноза риска столкновений в космосе, а в будущем – предоставило бы возможность активной очистки ОКП от космического мусора прямым воздействием на его элементы [12,22].

Временное обеспечение угловых измерений

Реализация прецизионной точности измерений угловых положений КА потребует проведения измерений с временным обеспечением такого же уровня. Например, круговая орбитальная скорость относительно Земли на расстоянии 400 тыс. км (орбита Луны) составляет 1000 м/с, поэтому КА может сместиться на величину ошибки 20 см (табл. 2) за 0,5 мс. Оптический маяк с режимом непрерывного свечения должен иметь неприемлемую световую мощность, чтобы за доли миллисекунды в дугомер-интерферометр попало достаточное число квантов. Для КА в дальнем космосе удобнее использовать оптические маяки, работающие в режиме импульсного свечения с продолжительностью импульса менее 1 миллисекунды. В этом случае можно будет гарантировать, что проведенные с дугомер-интерферометром измерения относятся к регистрации одного светового импульса, и временная привязка этих измерений относится к моменту излучения. Скважность импульсов оптического маяка для далеких КА может быть очень низкой – до одного импульса в несколько секунд.

Навигация межпланетных КА

Измерение пространственного положения КА в межпланетном пространстве крайне важно для проведения коррекции траектории КА при проведении межпланетных миссий. До сих пор не существует систем автономной навигации этого уровня. В поисках приемлемого решения этой задачи американцы даже предпринимают попытки разработки принципов навигации по измерению импульсного радиоизлучения пульсаров.

К сожалению, физические возможности оптических измерений имеют свои непреодолимые ограничения. В частности, для проведения акта единичного измерения углового положения источника света с помощью дугомера-интерферометра требуется регистрация 50 тыс. квантов. Их суммарная энергия невелика: она составляет всего $1,5 \cdot 10^{-15}$ Дж. Однако, при расчете мощности излучателя приходится учитывать реальное расхождение светового луча и возможности его приема измерительным устройством. Например, если исходить из конструкции дугомера-интерферометра «ЛИДА» [15], то его входная апертура имеет площадь 300 см². Для его уверенной работы необходимо, чтобы источник света создавал световой поток мощностью $5 \cdot 10^{-16}$ Дж/см². Если принять расходимость светового пучка от полупроводникового лазера равной $10'' = 5 \cdot 10^{-5}$ рад, то такую освещенность создаст излучатель с импульсной мощностью 1 Дж на расстоянии $7 \cdot 10^6$ км. При этом световое пятно от излучателя на расстоянии 7 млн. км от него будет иметь размер всего 140 км. В принципе, точность звездных датчиков на борту КА может позволить наведение луча маяка на измерительное устройство с такой точностью, хотя это окажется непростой операцией. При необходимости расходимость лазерного луча может быть уменьшена до $1''$, что при десятикратном повышении точности наведения луча обеспечить проведение измерений на расстоянии 100 млн км (превышает расстояние от Земли до Марса в момент противостояния). Точность подобного измерения по положению в тангенциальном направлении может достигать 5 метров (табл. 2). Для практической навигации эти возможности едва ли будут востребованы в ближайшие десятилетия, но они могут

представлять интерес для фундаментальной науки, - например, для уточнения величины гравитационной постоянной и масштабов Солнечной системы.

Список источников

1. Дмитриев А.Л. Полупроводниковые источники света для систем передачи и обработки информации. – СПб.: СПбГУИТМО. 2006. - 48 с.
2. Багров А.В., Барабанов А.А., Вернигора Л.В., Вятлев П.А., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М., Сысоев В.К. Применение лазерных диодных маяков для определения координат космических и наземных объектов // Космические исследования. 2013. Т. 51. № 4. С. 1-9.
3. Багров А.В., Вернигора Л.В., Вятлев П.А., Мартынов М.Б., Папченко Б.Н., Сысоев В.К. Создание светодиодных оптических маяков для космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2011. № 4. С. 37-43.
4. Вернигора Л.В., Пичхадзе К.М., Сысоев В.К. Анализ параметров излучателя оптического маяка для системы навигации космических аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84553>
5. Вернигора Л.В., Казмерчук П.В., Сысоев В.К., Дмитриев А.О. Методика измерения координат лунных посадочных станций с помощью оптических телевизионных средств космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=118698>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-12)
6. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. - Дрофа, 2004. - 544 с.
7. Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов. - М.:

Машиностроение, 1990. - 475 с.

8. Селезнев В.П., Кирст М.Л. Системы навигации космических летательных аппаратов. – М.: Воениздат, 1965. - 208 с.

9. Анисимов В.Д., Батырь Г.С., Меньшиков А.В., Шилин В.Д. Система контроля космического пространства РФ. URL: // <http://www.vimpel.ru/skkr2.htm>

10. Пинигин Г.И. Телескопы наземной оптической астрометрии. - Николаев: Атолл, 2000. - 108 с.

11. Медвед Д.Б. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь // Вестник связи. № 4. 2001. С. 154-157.

12. Соколов Н.Л. Метод определения орбитальных параметров космического мусора бортовыми средствами космического аппарата // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=52950>

13. Молотов И.Е., Вольвач А.Е., Коноваленко А.А., Фалькович И.С., Литвиненко Л.Н., Негода А.А., Федоров О.П., Липатов Б.Н., Горшенков Ю.Н., Агапов В.М., Туккари Дж., Лю Ш. Международные эксперименты по исследованию околоземных объектов с помощью метода РСДБ-локации // Космическая наука и технология. 2004. Т. 10. №2-3. С. 87-92.

14. Конникова В.К., Лехт Е.Е., Силантьев Н.А. Практическая радиоастрономия. - М.: Изд-во МГУ, 2011. - 304 с.

15. Боярчук А.А., Багров А.В., Барабанов С.И. и др. Космический астрометрический эксперимент ОЗИРИС. - Фрязино: «Век-2», 2005. - 350 с.

16. Алифанов О.М, Анфимов Н.А., Беляев В.С. и др. Фундаментальные космические исследования. Астрофизика. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. Кн. 1. - 431 с.

17. Багров А.В. Дугомер-интерферометр «ОЗИРИС» для микросекундной астрометрии – презентация. URL: <http://www.myshared.ru/slide/630188/>
18. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.0.) - М.: КНИЦ ВКС, 2002. - 60 с.
19. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1). Техническое описание параметров и сигнала ГЛОНАСС. – М.: Российский НИИ космического приборостроения, 2008. URL: <https://studizba.com/files/show/pdf/51137-1-interfeysnyy-kontrol-nyy-dokument.html>
20. Дятлов С.А., Бессонов Р.В. Обзор звёздных датчиков ориентации космических аппаратов // Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов» (Таруса, 22-25 сентября 2008): сборник трудов. – М.: Институт космических исследований РАН, 2009. С. 11-32.
21. Прохоров М.Е., Захаров А.И., Миронов А.В., Николаев Ф.Н., Тучин М.С. Современные датчики звездной ориентации // Труды 38 международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 2- 6 февраля 2009). – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2009. С. 170-186.
22. Авдеев А.В., Метельников А.А. Бортовая лазерная силовая установка для борьбы с космическим мусором // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72840>

References

1. Dmitriev A.L. *Poluprovodnikovye istochniki sveta dlya sistem peredachi i obrabotki informatsii* (Semiconductor light sources for the transmission and processing of information), Saint Petersburg, SPbGUITMO, 2006, 48 p.
2. Bagrov A.V., Barabanov A.A., Vernigora L.V., Vyatlev P.A., Martynov M.B., Pichkhadze K.M., Sysoev V.K. *Kosmicheskie issledovaniya*, 2013, vol. 51, no. 4, pp. 1-9.
3. Bagrov A.V., Vernigora L.V., Vyatlev P.A., Martynov M.B., Papchenko B.N., Sysoev V.K. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2011, no. 4, pp. 37-43.
4. Vernigora L.V., Pichkhadze K.M., Sysoev V.K. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84553>
5. Vernigora L.V., Kazmerchuk P.V., Sysoev V.K., Dmitriev A.O. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118698>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-12)
6. Ivanov N.M., Lysenko L.N. *Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov* (Ballistics and spacecraft navigation), Moscow, Drofa, 2004, 544 p.
7. Razygraev A.P. *Osnovy upravleniya poletom kosmicheskikh apparatov* (Spacecraft flight control basics), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 475 p.
8. Seleznev V.P., Kirst M.L. *Sistemy navigatsii kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* (Spacecraft navigation systems), Moscow, Voenizdat, 1965, 208 p.
9. Anisimov V.D., Batyr' G.S., Men'shikov A.V., Shilin V.D. *Sistema kontrolya kosmicheskogo prostranstva RF*. URL: // <http://www.vimpel.ru/skcp2.htm>
10. Pinigin G.I. *Teleskopy nazemnoi opticheskoi astrometrii* (Telescopes for ground-based optical astrometry), Nikolaev, Atoll, 2000, 108 p.
11. Medved D.B. *Vestnik svyazi*, no. 4, 2001, pp. 154-157.

12. Sokolov N.L. *Trudy MAI*, 2014, no. 77. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=52950>
13. Molotov I.E., Vol'vach A.E., Konovalenko A.A., Fal'kovich I.S., Litvinenko L.N., Negoda A.A., Fedorov O.P., Lipatov B.N., Gorshenkov Yu.N., Agapov V.M., Tukhari Dzh., Lyu Sh. *Kosmicheskaya nauka i tekhnologiya*, 2004, vol. 10, no. 2-3, pp. 87-92.
14. Konnikova V.K., Lekht E.E., Silant'ev N.A. *Prakticheskaya radioastronomiya* (Practical radio astronomy), Moscow, Izd-vo MGU, 2011, 304 p.
15. Boyarchuk A.A., Bagrov A.V., Barabanov S.I. et al. *Kosmicheskii astrometricheskii eksperiment OZIRIS* (OZIRIS Astrometric Space Experiment), Fryazino, «Vek-2», 2005, 350 p.
16. Alifanov O.M, Anfimov N.A., Belyaev V.S. et al. *Fundamental'nye kosmicheskie issledovaniya. Astrofizika* (Fundamental space research. Astrophysics), Moscow, FIZMATLIT, 2014, Book. 1, 431 p.
17. Bagrov A.V. *Dugomer-interferometr «OZIRIS» dlya mikrosekundnoi astrometrii – prezentatsiya*. URL: <http://www.myshared.ru/slide/630188/>
18. *Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema GLONASS. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument (redaktsiya 5.0.)* (Global navigation satellite system GLONASS. Interface control document), Moscow, KNITs VKS, 2002, 60 p.
19. *Interfeisnyi kontrol'nyi dokument (redaktsiya 5.1). Tekhnicheskoe opisanie parametrov i signala GLONASS* (Interface control document (revision 5.1.), 2008. URL: <https://studizba.com/files/show/pdf/51137-1-interfeysnyy-kontrol-nyy-dokument.html>
20. Dyatlov S.A., Bessonov R.V. *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennye problemy opredeleniya orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov»:*

sbornik trudov. Moscow, Institut kosmicheskikh issledovaniy RAN, 2009, pp. 11-32.

21. Prokhorov M.E., Zakharov A.I., Mironov A.V., Nikolaev F.N., Tuchin M.S. *Trudy 38 mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii*, Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2009, pp. 170-186.

22. Avdeev A.V., Metel'nikov A.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=72840>

Статья поступила в редакцию 29.10.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 21.12.2021.

The article was submitted on 29.10.2021; approved after reviewing on 10.11.2021; accepted for publication on 21.12.2021.