

# ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 535.31:681.7 53.082.5

## ЛАЗЕРНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СБЛИЖЕНИЯ И СТЫКОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2015 г. Н. А. Грязнов, канд. физ.-мат. наук; В. И. Купренюк, канд. физ.-мат. наук; Е. Н. Соснов

Центральный научно исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург

E-mail: gna@rtc.ru, kuprenyuk@mail.ru, e.sosnov@rtc.ru

Проанализированы параметры лазерных космических бортовых систем для обеспечения сближения и стыковки космических аппаратов. Показано, что при поиске космического объекта сканирующие системы имеют преимущества перед системами активного видения на основе видеокамеры с лазерной подсветкой (так называемыми 3D-FlashLADAR-системами). С другой стороны, 3D-FlashLADAR-системы имеют максимальную информационную производительность. Рассмотрена гибридная схема линейного локатора, сочетающая достоинства лазерных сканирующих систем и 3D-FlashLADAR-устройств.

*Ключевые слова:* лазерная локация, сканирование, 3D-FlashLADAR, производительность, времяпролетный метод, космический аппарат.

Коды OCIS: 280.3640.

Поступила в редакцию 09.12.2014.

### Введение

В настоящее время для обеспечения сближения и стыковки космических аппаратов (КА) используется радиотехническая система взаимных траекторных измерений “Курс”, осуществляющая измерения с дальности 200 км и обеспечивающая контакт при стыковке со скоростью около 0,3 м/с и линейной точностью 0,10–0,15 м [1]. Под процессом сближения, как правило, понимается управляемое перемещение центра масс одного КА (активного, осуществляющего маневрирование) относительно другого КА (пассивного, не осуществляющего маневрирования) [2]. С точки зрения проведения измерений относительного положения, система “Курс” принципиально является активно-активной, измерения проводятся как на борту активного КА, так и на борту пассивного КА.

Лазерные локационные системы (ЛЛС) обладают рядом преимуществ по сравнению с радиотехническими средствами. Существенно мень-

шая длина волны позволяет осуществлять измерения параметров относительного движения с большей точностью при значительно меньших габаритах и массе оптических антенн (формирующих оптических систем). При этом система является активно-пассивной, не требуя размещения аппаратуры на борту пассивного КА, или, в случае кооперируемого аппарата, используя для увеличения эффективности системы размещение на пассивном КА ретрорефлекторов, составленных из зеркальных угловых отражателей или трипель-призм.

### Лазерные системы обеспечения сближения и стыковки КА

К настоящему времени проведен целый ряд экспериментов по использованию работающих в оптическом диапазоне средств сближения КА с международной космической станцией (МКС) и многоразовыми КА Space Shuttle [3, 4]. В числе этих устройств были как лазерные локационные

системы, сканирующие узкий лазерный луч по двум ортогональным координатам, так и системы без сканирования с лазерной подсветкой, которые можно отнести к лазерным системам видения. Большинство экспериментов проводилось при работе по уголкового отражателям, специальным образом размещенным на пассивном КА.

Среди систем, продемонстрировавших наилучшие результаты, следует отметить лазерный сканирующий локализатор Rendezvous Lidar Sensor (RLS) фирмы MDA Optech (Канада) [5]. Эта система построена на основе волоконного лазера с длительностью импульса излучения 1 нс, работающего при частоте повторения от 8 до 10 кГц. Сканирование по ортогональным координатам осуществляется двумя независимо управляемыми зеркалами в диапазоне  $\pm 10^\circ$ . При работе по диффузно отражающему объекту удалось достичь рабочей дальности 3 км. При этом погрешность определения дальности составила 1 см, погрешность определения углового положения –  $0,2^\circ$ . При определении погрешности измерения дальности речь идет об определении расстояния до ближайшей точки объекта по переднему фронту отраженного сигнала, когда длительность зондирующего импульса и форма объекта не влияют на результат измерений. Частота выдачи координатной информации в центральный процессор составила 10 Гц, масса прибора – 10 кг, энергопотребление – 75 Вт.

Другая испытанная в космосе лазерная сканирующая система – телегонометр TGM фирмы Jena Optronik [6], использующая в качестве излучателя лазерный диод с длиной волны 0,91 мкм, продемонстрировала рабочую дальность 1,5 км при работе по системе уголкового отражателя. Поле зрения прибора составляло  $40 \times 40^\circ$ , частота выдачи информации не превышала 3 Гц, масса прибора 14,3 кг, энергопотребление 70 Вт.

Примером альтернативного подхода к построению системы сближения является аппаратура “DragonEye” фирмы Advanced Scientific Concepts Inc [7], функционирующая на основе технологии активного видения и на базе 3D-видеокамеры с лазерной подсветкой (так называемый 3D-FlashLADAR). Аппаратура 3D-FlashLADAR не использует подвижных механических узлов, что является существенным достоинством системы, работающей в условиях открытого космоса. Лазер подсветки с длиной волны 1,57 мкм работал на частоте 30 Гц, энергия в импульсе составляла от 2,5 до 7,0 мДж.

Поле зрения прибора составляло  $45 \times 45^\circ$ , разрешение по углам определялось размерностью использованной матрицы  $128 \times 128$  элементов. При работе по набору уголкового отражателей “Созвездие”, установленных на американском сегменте МКС, максимальная дальность измерений составила 1,5 км, масса аппаратуры – 3 кг, энергопотребление – 35 Вт.

Еще одной системой, построенной по технологии 3D-FlashLADAR и прошедшей летные испытания, стала система Vision Navigation Sensor (VNS) [8], разработанная исследовательским центром NASA в Лэнгли. Измерения проводились по тому же набору уголкового отражателей “Созвездие”. Дальность измерений составила 5 км при поле подсветки  $12^\circ \times 20^\circ$ . Фотоприемное устройство имело поле зрения  $20^\circ$ , разрешение по углам соответствовало размерности использованной матрицы  $256 \times 256$  элементов. Использовался лазер подсветки, аналогичный примененному в аппаратуре “Dragon Eye”. Прибор может осуществлять визуализацию формируемого трехмерного изображения. Масса аппаратуры составила 13 кг при энергопотреблении 30 Вт.

В России в данный момент системы на базе 3D-FlashLADAR-технологии могут создаваться только с использованием импортных фотоприемных матриц. В качестве бортовой лазерной локационной системы для перспективного космического корабля (ОАО “РКК “Энергия им. С.П. Королева”) в настоящее время в ЦНИИ РТК разрабатывается лидарная измерительная система “ЛИС” [9]. Эта система должна обнаруживать пассивный КА с расстояния 30 км при наличии на объекте системы уголкового отражателя и с расстояния 10 км – при их отсутствии. Поле обзора в режиме поиска должно составлять  $40^\circ \times 40^\circ$ , время обзора – не более 20 с. Частота обновления координатной информации об объекте на средних и ближних дистанциях, когда объект уже может быть опознан, а зона сканирования уменьшена, должна быть увеличена до 5 Гц. Масса прибора не должна превышать 15 кг, а энергопотребление в активной фазе должно быть не более 100 Вт.

Для количественного сравнения разработанных и разрабатываемых систем сближения введем понятие пространственной производительности системы  $S_{vol}$

$$S_{vol} = V / T_{full}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем зондируемого пространства,  $T_{full}$  – время обзора.

Поскольку для космических систем важнейшими параметрами являются также энергопотребление прибора и его масса [10], введем понятия удельной производительности по энергетике  $s_{en}$  и по массе  $s_m$

$$s_{en} = S_{vol} / W_0, \quad (2)$$

$$s_m = S_{vol} / M, \quad (3)$$

где  $W_0$  – энергопотребление прибора,  $M$  – масса прибора.

В табл. 1 приведены характеристики производительности испытанных бортовых ЛЛС и разрабатываемой системы “ЛИС”.

По данным табл. 1, при работе по набору уголкового отражателей из уже апробированных систем по пространственной производительности и удельной производительности по энергетике лучшие показатели у системы Vision Navigation Sensor, а по удельной производительности по массе – у другой 3D-FlashLADAR-системы, – “Dragon Eye”. Вместе с тем разрабатываемая сканирующая лидарная измерительная система “ЛИС” превосходит как ту, так и другую систему по обоим показателям.

Если оперировать параметрами, заявленными производителем, при работе по диффузно отражающему объекту система “ЛИС” уступает сканирующей системе RLS. Однако заявленная производителем частота вывода информации, равная 10 Гц, не является характеристикой полного времени обзора. Действительно, при частоте следования импульсов 10 кГц, поле зрения  $20 \times 20^\circ$ , разрешении по углу  $0,2^\circ$  время полного обзора составит не менее 1 с. Таким образом, частота вывода полного объема информации в режиме поиска не может быть более 1 Гц, что приводит к уменьшению производительности на порядок по сравнению с заявленной. Следовательно, характеристики системы

**Таблица 1.** Сравнение пространственной производительности лазерных локационных систем в режиме поиска (обнаружения)

Система	$S_{vol}$ , км <sup>3</sup> /с	$s_{en}$ , км <sup>3</sup> /(Вт с)	$s_m$ , км <sup>3</sup> /(с кг)
При работе по набору уголкового отражателей			
TGM	1,28	0,018	0,09
Dragon Eye	16,1	0,46	5,4
VNS	50,9	1,70	3,9
“ЛИС”	170,5	1,71	11,4
При работе по диффузно отражающему объекту			
RLS	8,591	0,115	0,86
“ЛИС”	6,315	0,063	0,42

“ЛИС” будут превосходить таковые для систем, прошедших летные испытания, по всем показателям пространственной производительности.

Еще одной характеристикой измерительной системы может быть информационная производительность  $P_{inf}$ , характеризующая объем информации (предельное число точек в трехмерном пространстве), получаемой в единицу времени.

Для классических сканирующих лазерных локационных систем эта величина равна частоте повторения импульсов лазера  $f_{rep}$ , если в системе не предусмотрено дополнительного стробирования. Таким образом, для классических ЛЛС максимально возможная информационная производительность составляет

$$P_{inf} = f_{rep}. \quad (4)$$

Для систем, построенных по технологии 3D-FlashLADAR и использующих приемную матрицу  $N_1 \times N_2$  элементов при частоте повторения импульсов лазера подсветки  $f_{rep}$ , информационная производительность определяется выражением

$$P_{inf} = f_{rep} N_1 N_2. \quad (5)$$

Определяя аналогично формулам (2) и (3) удельные информационные производительности по энергетике  $p_{en}$  и по массе  $p_m$ , получаем

$$p_{en} = P_{inf} / W_0, \quad (6)$$

$$p_m = P_{inf} / M. \quad (7)$$

В табл. 2 приведены оценки максимальной информационной производительности для рассмотренных выше систем в режиме поиска (обнаружения КА).

Как видно из таблицы, в режиме поиска сканирующие ЛЛС заметно уступают по информационной производительности 3D-FlashLADAR-системам. Однако в средней и ближней зонах, когда зона сканирования может быть уменьшена, столь сильный разрыв между информационными производительностями систем двух типов

**Таблица 2.** Сравнение информационной производительности лазерных локационных систем в режиме поиска (обнаружения)

Система	$P_{inf}$ , точек/с	$p_{en}$ , точек/(Вт с)	$p_m$ , точек/(с кг)
TGM	10 000	143	699
Dragon Eye	491 520	14 043	163 840
VNS	1 966 080	65 536	151 237
RLS	10 000	133	1 000
“ЛИС”	50 000	500	3 333

может быть частично компенсирован. Системы, построенные по технологии 3D-FlashLADAR, имеют высокую производительность, но сравнительно низкое пространственное разрешение. Кроме того, они требуют от лазера в  $N_1 \times N_2$  раз большей энергии в каждом импульсе, чем классические ЛЛС. Требуемые уровни энергии, как правило, недостижимы для находящихся применение в космических условиях типов лазеров.

Существует возможность увеличения информационной производительности сканирующей локационной системы путем повышения частоты повторения следования импульсов на выходе волоконного лазера вплоть до 1 МГц, но это потребует соответствующего повышения скоростей сканирования. Кроме того, возникнут проблемы с однозначностью определения дальности времяпролетным методом. Так, при частоте повторения 50 кГц зона однозначного определения дальности не превысит 3 км. Применение систем кодировки зондирующих импульсов [11] не способно решить задачу при столь высоких частотах следования импульсов.

Проведенный анализ показал, что современные сканирующие ЛЛС имеют лучшую пространственную производительность, включая удельные характеристики по энергопотреблению и по массе. По информационной производительности более высокие показатели имеют системы, построенные по технологии 3D-FlashLADAR.

С точки зрения построения перспективной лазерно-оптической системы обеспечения сближения и стыковки космических аппаратов, возможны два решения. Первое связано с созданием комплекса аппаратуры, где каждая подсистема

решает задачи сближения на определенном участке траектории. Второй путь – создание гибридной системы, сочетающей преимущества сканирующих ЛЛС и систем на основе 3D-FlashLADAR.

### Линейный локатор

В линейном локаторе используется одномерный массив времяпролетных фотоприемников, а сканирование осуществляется по координате, ортогональной линейке приемников. При этом пространственное распределение излучения подсветки формируется в виде линии, для которой расходимость по одной координате соответствует полю зрения одиночного приемника, а по другой координате (перпендикулярно которой происходит сканирование) соответствует полному полю обзора по этой координате.

Сравнительные схемы построения систем локации приведены на рис. 1.

Рассмотрим возможности локатора, построенного по схеме одномерного сканирования. Для сравнения производительности такого локатора с известными системами обсудим его возможности по обнаружению объекта, на котором установлены уголкового отражатели, так как большинство экспериментов были проведены именно в таких условиях. В качестве источника излучения для оценок рассмотрим серийный лазер ТЕСН-1053-Advanced производства фирмы “Лазер-экспорт” (Москва). Для этого лазера энергия в импульсе равна 1 мДж, частота следования может варьироваться от 0 до 4кГц, длительность импульса равна 4 нс, масса лазера с блоком питания не превышает

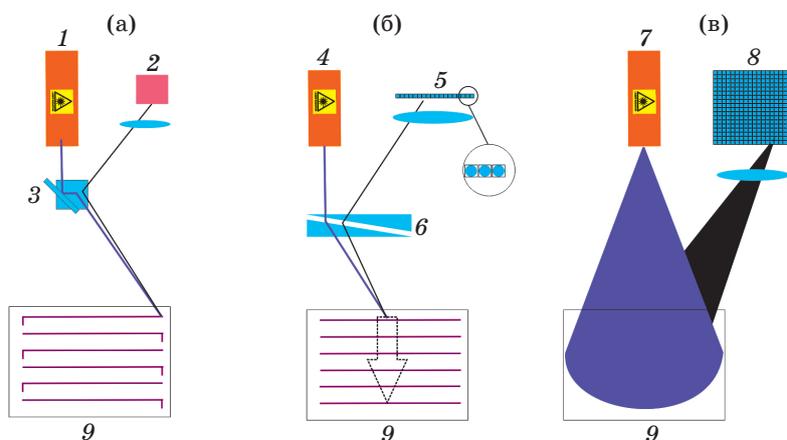


Рис. 1. Схема построения сканирующей ЛЛС (а), линейного локатора (б) и 3D-FlashLADAR (в). 1 – лазерный источник, 2 – одиночный приемник, 3 – двумерный сканер, 4 – лазерный источник с анизотропным пространственным распределением (генератор линии), 5 – линейный приемник, 6 – одномерный сканер, 7 – лазерный источник двумерной подсветки, 8 – матричный приемник, 9 – поле зрения локатора.

3,5 кг, энергопотребление не более 70 Вт. В качестве системы регистрации рассмотрим линейный приемник, содержащий 256 элементов. Скорость сканирования по угловой координате примем равной 400 град/с (что соответствует 66,7 об/мин), чтобы угловое разрешение было одинаковым по обеим координатам. При частоте следования импульсов 2,56 кГц время полного обзора составит 0,1 с (частота кадров 10 Гц). Общая масса ЛЛС не превысит 6 кг, энергопотребление – не более 100 Вт. Система формирования пространственного распределения излучения должна формировать расходимость пучка  $40^\circ \times 9,4'$  (2,7 мрад). Диаметр приемного объектива положим равным 60 мм, суммарное пропускание приемного и передающего тракта полагаем равным 0,7.

В качестве наблюдаемого объекта рассмотрим набор уголкового отражателя с эффективной площадью  $0,01 \text{ м}^2$  и коэффициентом отражения 0,85 [10]. Погрешности изготовления и сборки уголкового отражателя примем близкими к дифракционной угловой расходимости лазерного пучка с поперечным сечением, соответствующим апертуре одиночного уголкового отражателя.

Оценки показывают, что при дальности до объекта 10 км и с учетом всех потерь мощность сигнала на входе приемника ( $P_{in}$ ) равна 7,5 нВт. При использовании лавинного фотодиода (ЛФД) с чувствительностью  $\sigma$ , равной 0,6 А/Вт в спектральной области 1,053 мкм, и внутридетекторного усиления  $A$  сигнала в 25 раз на выходе ЛФД получаем сигнал в наноамперах (нА)

$$P_{in} \sigma A = 11,3. \quad (8)$$

Учитывая емкость  $C$  перехода ЛФД, равную  $C = 2$  пф, и требуемую полосу пропускания приемного тракта  $B$ , равную  $\approx 100$  МГц, допустимо использование сопротивления нагрузки (кОм)

$$R = B / 2C = 2,5. \quad (9)$$

Напряжение сигнала на указанном сопротивлении составит 280 мкВ.

Напряжение теплового шума  $U_n$  на активном сопротивлении вычисляется по формуле Джонсона

$$U_n = \left( 4kTB/R \right)^{1/2}. \quad (10)$$

На сопротивлении в 2,5 кОм при температуре  $T = 300$  К оно составляет 60–70 мкВ. Таким образом, мы имеем четырехкратное превышение сигнала над шумом, которое обеспечивает

регистрацию сигнала на дальности 10 км с достаточно высокой вероятностью.

Рассчитывая параметры производительности по формулам (1)–(7), получаем

$$S_{vol} = 1263 \text{ км}^3/\text{с}, \quad s_m = 210,5 \text{ км}^3/(\text{с кг}), \quad s_{en} = 12,6 \text{ км}^3/(\text{Вт с});$$

$$P_{inf} = 655360 \text{ точек/с}, \quad p_m = 109226 \text{ точек}/(\text{с кг}), \quad p_{en} = 6553 \text{ точек}/(\text{Вт с}).$$

Сравнивая эти результаты с данными в табл. 1 и 2, можно сделать вывод, что такой линейный локатор превосходит рассмотренные системы по пространственной производительности, а по информационной производительности оказывается сравним с устройствами, построенными по технологии 3D-FlashLADAR.

### Схема построения линейного локатора

На рис. 2 приведена структурная схема линейного локатора. Излучение лазерного источника 1 проходит через систему формирования анизотропного пространственного распределения 2 и через вспомогательное зеркало 3 и систему сканирования по одной угловой координате 4–6 направляется в сторону наблюдаемого объекта. Отраженное или диффузно рассеянное от объекта излучение через систему сканиро-

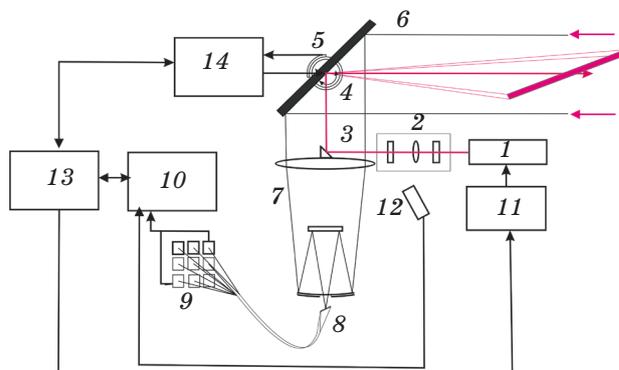


Рис. 2. Структурная схема линейного локатора. 1 – лазерный источник, 2 – система формирования анизотропного пространственного распределения, 3 – вспомогательное зеркало, 4 – привод сканирования, 5 – датчик угла, 6 – система сканирования по одной угловой координате, 7 – входной объектив приемной системы, 8 – линейный приемник, 9 – многоэлементное фотоприемное устройство, 10 – система обработки сигналов, 11 – блок питания лазерного источника, 12 – датчик старта импульса, 13 – центральный процессор, 14 – контроллер привода сканирующего зеркала.

вания попадает на входной объектив приемной системы 7. Входной объектив формирует изображение на линейном приемнике 8.

Линейный приемник образован торцами 256 волокон, спеченных в линейку. Диаметр каждого волокна (или нескольких волокон, суммарный размер которых равен расчетному диаметру волокна) равен  $d = F\Omega/N$ , где  $F$  – эквивалентный фокус приемного объектива,  $\Omega$  – поле зрения приемного объектива, равное полю сканирования,  $N$  – число элементов разрешения (пикселей) в поле сканирования. Приемный объектив обеспечивает формирование кружка рассеяния принимаемого излучения с размером, соответствующим размеру пиксела.

Торцевые волокна далее формируются в жгут, транспортирующий принимаемые световые импульсы к элементам многоэлементного фотоприемного устройства 9, представляющего собой набор отдельных высокоскоростных, высокочувствительных одноплощадочных фотоприемников, например лавинных фотодиодов, с микросхемами предусилителей.

На систему обработки эхо-сигналов 10 поступают принятые фотоприемниками импульсы и старт-импульсы с датчика старта импульса 12, регистрирующего момент излучения импульса лазером за счет рассеяния излучения на поверхности элементов 2. Результат измерения времени пролета и номер фотоприемника, с которого получен эхо-сигнал, поступают в центральный процессор 13.

В центральный процессор 13 поступают также данные с датчика угла 5 привода сканирования 4. Обработка этих данных позволяет построить 3D-рельеф зондируемого пространства [12]. Кроме функций обработки данных с указанных выше датчиков и фотоприемников, центральный процессор 13 обеспечивает управление блоком питания лазера 11 и контроллером привода сканирующего зеркала 14. Как уже говорилось, в качестве излучателя предполагается использовать твердотельный лазер с диодной накачкой и модуляцией добротности. Он должен работать в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов до нескольких килогерц и энергией в импульсе несколько миллиджолей.

Система формирования зондирующего пучка 2 может быть построена на базе классической цилиндрической оптики или с использованием специальных голографических пространственных устройств формирования анизотропного распределения.

Предполагается, что система линейного сканирования будет организована с использованием однокоординатного сканирующего зеркала с электромагнитным приводом или с использованием системы из двух вращающихся клиньев.

В качестве фотоприемника может быть использована линейка фотодиодов. Поскольку в настоящее время такие линейки не выпускаются российскими производителями, рассматривается вариант описанной выше оптоволоконной системы. Такой способ реализации позволяет использовать не только импортные, но и отечественные серийно выпускаемые фотоприемники. Кроме того, при использовании волоконной системы, позволяющей варьировать размеры пиксела приемника, легче согласовать и оптимизировать параметры фотоприемника и приемного объектива.

## Заключение

Проведенный анализ показал, что лазерная локационная система, построенная по схеме линейного локатора, имеет существенно большую пространственную производительность по сравнению с испытанными в космических условиях ЛЛС сближения и стыковки. По информационной производительности линейный локатор превосходит существующие и разрабатываемые лазерные космические сканирующие системы и приближается к системам, построенным по технологии 3D-FlashLADAR. Такой прибор может быть реализован на основе линейного время-пролетного датчика на базе лавинных фотодиодов, наносекундного импульсно-периодического твердотельного лазера с энергией импульса в несколько миллиджолей и частотой повторения импульсов в единицы килогерц, системы формирования анизотропного распределения излучения подсветки и механического одномерного сканирующего устройства. При этом требуемая скорость сканирования не превышает 100 об/мин.

Вышеприведенные оценки работоспособности прибора проведены на основе параметров коммерчески доступных элементов, что подтверждает реализуемость такой аппаратуры.

Статья подготовлена при поддержке Министерства образования и науки в ходе выполнения работ по Соглашению от 08.07.2014 г. № 14.575.21.0055 о предоставлении субсидии в целях реализации федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 г.”.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Легостаев В.П., Микрин Е.А., Орловский И.В., Платонов В.Н., Борисенко Ю. Н., Евдокимов С.Н.* Создание и развитие систем управления движением транспортных космических кораблей “Союз” и “Прогресс”: опыт эксплуатации, планируемая модернизация аппаратов // Труды МФТИ. 2009. Т. 1. № 3. С.4–13.
2. *Гончаревский В.С.* Радиоуправление сближением космических аппаратов. М.: Советское радио, 1976. 240 с.
3. *Старовойтов Е.И.* Бортовые лазерные локационные системы космических аппаратов: Учебное пособие. Королев: ОАО “РКК “Энергия”, 2015. 120 с.
4. *Старовойтов Е.И.* Оптические и оптико-электронные приборы и системы космических аппаратов: Учебное пособие. Королев: ОАО “РКК “Энергия”, 2014. 56 с.
5. *Allen A.C.M., Langley C., Mukherji R., Taylor A.B., Umasuthan M., Barfoot T.D.* Rendezvous lidar sensor system for terminal rendezvous, capture, and berthing to the International Space Station // Proc. SPIE. 2008. V. 6958. P. 69580S.
6. *Moebius B., Kolk K.-H.* Rendezvous sensor for automatic guidance of transfer vehicles to ISS: concept of the operational modes depending on actual optical and geometrical dynamical conditions // Proc. SPIE. 2000. V. 4134. P. 298–309.
7. *Piatti D., Rinaudo F.* SR-4000 and CamCube3.0 Time of Flight (ToF) cameras: tests and comparison // Remote Sens. 2012. V. 4. № 4. P. 1069–1089.
8. *Christian J., Hinkel H., D’Souza C., Maguire S., Patangan M.* The sensor test for Orion RelNav Risk Mitigation (STORRM) development test objective // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 2011. 2011. V. 2. P. 994–1013.
9. *Грязнов Н.А., Панталеев С.М., Иванов А.Е., Куликов Д.С.* Высокопроизводительный метод измерений координат объектов в условиях космического пространства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования. 2013. № 2 (171). С. 197–202.
10. *Зубов Н.Е., Савчук Д.В., Старовойтов Е.И.* Оптимизация массы и энергопотребления лазерных локационных систем для управления сближением и стыковкой космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 39–42.
11. *Лопота В.А., Легостаев В.П., Рудой И.Г., Сорока А.М., Зеленищikov А.Н.* Способ лазерной локации // Патент РФ № 2456637. 2010.
12. *Нгуен А.В., Михайлов Б.Б.* Метод распознавания многогранных 3D объектов // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1 (2). С. 65–70.