

КОНЦЕПТУАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ БОРТОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2016 г. Старовойтов Е.И.¹, Зубов Н.Е.^{1,2}

¹Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (РКК «Энергия») Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана) 2-я Бауманская ул., 5, г. Москва, Российская Федерация, 105005, e-mail: mail@bmstu.ru

В работе представлен новый подход к разработке бортовых лазерных локационных систем (ЛЛС), используемых при сближении и стыковке космических аппаратов. При этом подходе учитываются требования к аппаратуре и специфика ее применения. Описан порядок проведения расчетных оценок, используемый при концептуализации ЛЛС, который основан на имеющемся опыте разработки различных бортовых ЛЛС для перспективных космических аппаратов и результатах исследований по их реализации. На основе известного уравнения лазерной локации получены выражения для оценки динамического диапазона измерений ЛЛС при различных геометрических и отражательных характеристиках пассивного объекта. Обобщен имеющийся опыт наземных испытаний лазерной локационной аппаратуры, который может быть использован при испытаниях и отработке перспективных бортовых ЛЛС, и представлено описание необходимого оборудования.

Ключевые слова: лазерная локационная система, космический аппарат, сближение и стыковка, разработка, испытания.

CONCEPTUALIZATION OF DEVELOPMENT OF ONBOARD LASER RADAR SYSTEMS FOR SPACECRAFT

Starovoytov E.I.¹, Zubov N.E.^{1,2}

¹S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia) 4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

²Bauman Moscow State Technical University (Bauman MSTU) 5 2nd Bauman str., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: mail@bmstu.ru

The paper discusses a new approach to development of onboard Laser Ranging Systems (LRS) used during spacecraft rendezvous and docking. This approach takes into account requirements for the equipment and specifics of its application. The paper describes a procedure for performing computational evaluations used in the LRS conceptualizing, which is based on the existing experience in development of various onboard LRS for future spacecraft and the results of studies on their implementation. On the basis of the well-known laser ranging equation, expressions were obtained for evaluating the dynamic range of LRS measurements for various geometries and reflective properties of the passive object. The paper generalizes the existing experience of ground tests of laser ranging equipment, which can be used in tests and developmental testing of future onboard LRS and provides a description of the required equipment.

Key words: laser ranging system, spacecraft, rendezvous and docking, development, testing.



СТАРОВОЙТОВ Е.И.



ЗУБОВ Н.Е.

СТАРОВОЙТОВ Евгений Игоревич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru
 STAROVOYTOV Evgeny Igorevich — Candidate of Science (Engineering), Senior research scientist at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

ЗУБОВ Николай Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя НТИ РКК «Энергия», декан факультета РКТ МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: nikolayzubov@rsce.ru
 ZUBOV Nikolay Evgen'yevich — Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of STC at RSC Energia, Dean of the Faculty of rocket and space technology of the Bauman MSTU, e-mail: nikolayzubov@rsce.ru

Введение

Для управления сближением и стыковкой космических аппаратов (КА) наряду с радиотехническими системами в последние годы используются лазерные локационные системы (ЛЛС) [1, 2].

Перспективным КА следующего поколения в будущем предстоит решать транспортные задачи на орбитах Луны и других небесных тел. К ним относится обслуживание космических платформ, включающих орбитальные станции и взлетно-посадочные комплексы, с которыми будут выполняться операции сближения и стыковки.

При меньшей, по сравнению с радиотехническими системами, массе ЛЛС можно обеспечить экономию массы при выведении КА за пределы околоземной орбиты, а также повысить безопасность стыковки с элементами космической платформы за счет малой погрешности измерений и высокой разрешающей способности по углам.

Ряд образцов бортовых ЛЛС прошел летные испытания на околоземной орбите, однако реализация перспективных бортовых ЛЛС затрудняется тем, что в настоящее время они не обеспечивают тех дальностей измерений, показателей надежности и безопасности, которыми обладают радиотехнические системы. Также у разработчиков возникают трудности обеспечения заданных характеристик аппаратуры при ограниченном выборе производителей компонентной базы в условиях импортозамещения ряда комплектующих

иностранного производства, применяемых в отечественной промышленности.

Таким образом, в настоящее время не представляется возможным решение транспортных задач по обслуживанию космической платформы с использованием существующих вариантов бортовых ЛЛС вне околоземной орбиты. Требуется существенная доработка их конструкции, обеспечивающая получение технических характеристик, необходимых для системы управления движением и навигацией (СУДН) перспективных КА.

Для этой цели необходим новый подход к разработке бортовых ЛЛС, который учитывает требования к аппаратуре и специфику ее применения.

Характеристики перспективных бортовых ЛЛС и методология их разработки

Жизненный цикл ЛЛС включает те же этапы, которые последовательно проходят все технические изделия: концептуализация, проектирование, производство, эксплуатация и утилизация.

К техническим характеристикам перспективных бортовых ЛЛС по сравнению с другой аналогичной аппаратурой предъявляются противоречивые, а в ряде случаев и взаимоисключающие требования:

- большой динамический диапазон измерений ($>10^3$) на дальностях от долей метра при стыковке до десятков и сотен километров во время поиска пассивного КА;

- ненормированный коэффициент отражения элементов конструкции пассивного КА, который может иметь одиночные угловые отражатели (УО) или целые конгломераты УО, рабочие апертуры которых ориентированы в направлении ЛЛС, а работа осуществляется в условиях мощных световых помех от небесных тел;
- одновременное измерение дальности до пассивного КА и скорости сближения с ним, при этом к погрешности измерений скорости предъявляются более высокие требования, чем к погрешностям измерений дальности;
- безопасность излучения для органов зрения экипажа при зондировании пассивных пилотируемых КА, имеющих иллюминаторы;
- минимально возможные массогабаритные характеристики и потребляемая от бортовой сети мощность;
- устойчивость к внешним воздействующим факторам в космическом полете;
- высокая надежность — вероятность безотказной работы должна быть не менее 0,999.

Для выполнения требований ТЗ разработчик должен учитывать все вышеперечисленные аспекты (которые, тем не менее, не отражены в общепринятых подходах). Разработчик в условиях неопределенности будет сталкиваться с недостатком информации.

Приходится констатировать, что в существующей научной и учебной литературе по лазерной локационной аппаратуре [3–9] не раскрыт ряд принципиальных вопросов, имеющих особое значение для разработки бортовых ЛЛС. Ограниченно рассмотрены задачи измерения скорости подвижных объектов, рассмотрен только доплеровский метод измерения [5, 6]. При этом большая часть литературных источников к настоящему времени является устаревшей.

Также можно отметить, что в имеющейся литературе исчерпывающе изложены вопросы математического описания, обработки и распознавания локационных сигналов, общих методов проектирования аппаратуры, энергетических расчетов ЛЛС, описаны рассеивающие характеристики для различных типов объектов, источники оптических помех, методики расчета оптических систем, конструкции доплеровских измерителей скорости.

Проблемы оценки динамического диапазона измерений и влияния геометрического фактора для лазерных дальномеров, работающих по диффузно отраженному сигналу, а также конечно-разностный (дифференциальный) метод измерений скорости, были в небольшом объеме отражены в работах [10, 11].

К настоящему времени имеется небольшое количество публикаций по анализу и методам повышения надежности ЛЛС, а также по оптимизации их конструкции. В имеющейся литературе приводится обзор основных типов лазерных источников и фотодетекторов, но при этом недостаточно проанализированы взаимосвязь характеристик ЛЛС с используемой компонентной базой и взаимовлияние отдельных характеристик аппаратуры. Также в публикациях слабо освещены методы оценки погрешностей определения ориентации объекта локации — углов его разворота по тангажу, крену и курсу.

Динамический диапазон измерений, учет геометрического фактора, метод определения ориентации объекта, анализ надежности и вопросы оптимизации конструкции бортовых ЛЛС рассматривались Е.И. Старовойтовым в ряде статей и были обобщены им в работе [12].

Решаемые ЛЛС задачи и возможности принципиальной реализации аппаратуры определяются на этапе концептуализации.

Важнейшие эксплуатационные характеристики ЛЛС (дальность измерений, помехоустойчивость, потребляемая мощность) определяются мощностью лазерного источника и чувствительностью фотоприемного устройства (ФПУ). Поэтому при подготовке концепции построения ЛЛС, которая является основой для последующего проектирования, энергетические расчеты занимают центральное место.

В работе [8] описан порядок проведения расчетных оценок при разработке лазерных дальномеров, используемых для измерений на атмосферных трассах. Расчеты начинаются с выбора типа лазерного источника, при энергетических расчетах выполняется несколько приближений. К бортовым ЛЛС указанный подход неприменим, так как не принимаются во внимание погрешности измерений скорости сближения и дальности, показатели надежности, а также отсутствует оценка лазерной безопасности зондирующего излучения.

Главной особенностью, отличающей ЛЛС от аналогичной бортовой лазерной аппаратуры (систем межбортовой лазерной связи и беспроводной передачи электроэнергии), является широкий динамический диапазон измерений, которому соответствует диапазон погрешностей.

При проектировании ЛЛС с новой концепцией, как правило, изготавливают ее действующий макет, используемый для подтверждения основных технических решений. Для отработки действующего макета требуются

соответствующие методики испытаний и экспериментальная база.

В вышеперечисленной литературе недостаточно освещены вопросы оценки погрешностей измерений ЛЛС, а также их метрологической аттестации. Сведения о наземной отработке и испытаниях бортовых ЛЛС имеют отрывочный характер в отдельных публикациях.

Динамический диапазон измерений дальности и скорости ЛЛС, использование оптического аттенуатора

Из-за большого динамического диапазона для обеспечения измерений дальности и скорости с требуемой погрешностью может оказаться целесообразным использование в ЛЛС нескольких отдельных каналов для измерений в различных поддиапазонах дальностей.

В общем случае ЛЛС включает в себя лазерный источник, ФПУ, передающую и приемную оптические системы, блок управления и обработки данных. Если измерительный канал имеет все эти составные части, то его можно рассматривать как отдельную ЛЛС.

Количество и принцип работы измерительных каналов необходимо определить в самом начале разработки, при построении концепции ЛЛС. Для этого необходимы оценки дальности и динамического диапазона измерений, которые можно получить в ходе энергетического расчета.

Существующие лазерные высотомеры и скоростемеры выполняют измерения только по диффузно отражающим объектам, ручные лазерные дальномеры работают либо только по диффузно отражающим объектам, либо по объектам с УО. В настоящее время только к перспективным бортовым ЛЛС предъявляются требования выполнения измерений одновременно по крупноразмерным и по точечным объектам, имеющим диффузно рассеивающую поверхность и УО с различными характеристиками.

Для энергетического расчета используется «классическое» уравнение лазерной локации на основе приближений геометрической оптики для нескольких предельных случаев, наиболее часто встречающихся на практике [12]. При выводе этих выражений предполагается, что вся энергия зондирующего излучения равномерно распределена внутри телесного угла, соответствующего диаграмме излучения лазерного источника. Преобразование данных выражений позволяет определить динамический диапазон измерений ЛЛС (или отдельного канала ЛЛС).

Когда края зондирующего пучка не выходят за границы объекта во всем диапазоне дальностей D , динамический диапазон будет определяться выражением

$$\kappa_1 = \frac{D_{\max}^2}{D_{\min}^2}. \tag{1}$$

Если измерения выполняются по точечному объекту или объекту с УО, то тогда

$$\kappa_2 = \frac{D_{\max}^4}{D_{\min}^4}. \tag{2}$$

Выражение (2) также применимо при измерениях по объекту с УО. Ситуация усложняется, когда на максимальной дальности объект точечный, а на минимальной он полностью перекрывает сечение зондирующего пучка ЛЛС. Тогда

$$\kappa_3 = \frac{\Omega_{\text{пер}} D_{\max}^4}{S_{\text{об}} D_{\min}^2}, \tag{3}$$

где Ω – телесный угол; $S_{\text{об}}$ – площадь объекта.

Как видно из полученных выражений (1–3), динамический диапазон измерений во всех случаях не зависит от характеристик оптической системы, чувствительности ФПУ, расходимости и энергии зондирующего излучения ЛЛС.

Динамический диапазон принимаемого фотодетектором сигнала ограничен. Так, для лавинных фотодиодов он составляет 25...30 дБ, а для *pin*-фотодиодов (*pin*-ФД) ~60 дБ.

Может сложиться ситуация, когда ЛЛС, предназначенная для измерений по диффузно отраженному сигналу от точечного объекта, при сближении с ним на малой дальности засвечивает установленный там УО. Тогда динамический диапазон, на который рассчитывается приемный тракт ЛЛС, должен быть не менее, чем

$$\kappa_4 = \frac{S_{\text{УО}} \pi \rho_{\text{УО}} D_{\max}^4}{S_{\text{об}} \rho_{\text{об}} \Omega_{\text{отр}} D_{\min}^4}, \tag{4}$$

где $\rho_{\text{УО}}$ и $\rho_{\text{об}}$ – коэффициенты отражения УО и объекта, соответственно.

В случае, если ЛЛС выполняет измерения на максимальной дальности по крупноразмерному объекту, полностью перекрывающему зондирующий пучок, выражение (4) будет иметь вид

$$\kappa_5 = \frac{S_{\text{УО}} \pi \rho_{\text{УО}} D_{\max}^2}{\Omega_{\text{пер}} \Omega_{\text{отр}} \rho_{\text{об}} D_{\min}^4}. \tag{5}$$

При превышении сигналом динамического диапазона фотодетектора возникает его перегрузка, которая приводит к увеличению погрешностей измерений и разрешающей способности ЛЛС [11]. Очень мощный сигнал потенциально может повредить фотодетектор. Такая ситуация наиболее вероятна в случаях, соответствующих выражениям (4) и (5).

В таких случаях в приемном тракте ЛЛС предусматривается защита ФПУ от мощных отраженных сигналов. В бортовом высотометре ЛВ-В (разрабатывался для КА «Фобос-грунт»), который имел максимальную дальность измерений 60 км, при работе в диапазоне малых дальностей 1...10 км действовался оптический аттенюатор [13].

Оптические аттенюаторы широко используются в волоконно-оптических линиях связи. Они характеризуются начальными оптическими потерями, динамическим диапазоном, точностью регулировки вносимого затухания и устойчивостью к внешним воздействующим факторам.

Для ослабления излучения в аттенюаторе используются различные физические принципы. Ослабление может достигаться за счет механического перемещения элементов аттенюатора, деформации оптического волокна, по которому проходит излучение, либо с использованием электрооптического, магнитооптического и других эффектов.

Оптический аттенюатор, используемый в приемном тракте бортовой ЛЛС, должен иметь широкий диапазон вносимого затухания, обеспечивать приемлемую точность регулирования вносимого затухания, а также быть устойчивым к воздействию факторов космического полета.

Зависимости вносимого оптическим аттенюатором затухания в приемный тракт ЛЛС от дальности до пассивного КА для случаев диффузного отражения и использования УО представлены в работах [14, 15].

В уже упомянутом ЛВ-В (КА «Фобос-грунт») поддержание уровня принимаемого сигнала в пределах динамического диапазона ФПУ дополнительно обеспечивалось за счет изменения энергии зондирующего излучения. Для этого использовался источник излучения на основе $Nd:YAG$ -лазера, который имел схему «задающий генератор – усилитель» со ступенчатой регулировкой длительности накачки усилителя от максимальной до полного выключения [16].

В ЛЛС возможно также использование аналогичных лазерных источников с регулируемой мощностью излучения на основе волоконных лазеров.

Концептуализация лазерных локационных систем

Одним из авторов статьи, Е.И. Старовойтовым, разработан порядок проведения расчетных оценок, используемый при концептуализации ЛЛС, который отличается от представленного выше подхода для лазерных дальномеров. Основой для него послужили имеющийся опыт разработки различных бортовых ЛЛС для перспективных КА и результаты исследований по возможностям их реализации.

Концептуализация бортовых ЛЛС должна включать в себя следующие шаги:

- выбор диапазона дальностей измерений и обоснование необходимости размещения УО на пассивном КА;
- выбор числа каналов ЛЛС и используемого в них принципа измерений для соответствующих поддиапазонов дальностей в первом приближении;
- анализ выполнения требований по погрешности измерений дальности и скорости сближения для каждого канала ЛЛС;
- выбор числа каналов ЛЛС и используемого в них принципа измерений для соответствующих поддиапазонов дальностей во втором приближении с учетом предыдущего пункта;
- выбор лазерных источников (с определенной рабочей длиной волны и характеристиками излучения) и ФПУ для каждого канала ЛЛС, обеспечивающих достаточное отношение сигнал/шум в заданных светотехнических условиях;
- анализ динамического диапазона измерений каждого канала ЛЛС и необходимости использования оптических аттенюаторов;
- оценка теплового режима, показателей надежности и лазерной безопасности ЛЛС;
- многокритериальная оптимизация конструкции ЛЛС (при необходимости);
- формирование алгоритмов режимов функционирования ЛЛС, обеспечивающих безопасную и надежную работу аппаратуры (при необходимости).

В первую очередь определяется максимальная дальность измерений ЛЛС, которая позволяет с запасом перекрыть точности предварительного целеуказания и средств автономной навигации КА. На ее значение большое влияние оказывают отражательные характеристики пассивного КА и наличие на нем УО, необходимость размещения которых должна быть рассмотрена в самом начале разработки.

Минимальная дальность измерений определяется конструктивным расположением приемной апертуры ЛЛС на активном КА

и ближайшего габарита (или ответного устройства) на пассивном КА в состыкованном состоянии.

Исходя из диапазона измеряемых дальностей, необходимо определить число каналов в ЛЛС, принимая во внимание, что допустимые погрешности измерений на больших и малых дальностях могут отличаться на порядки.

На малых дальностях (<20 м) требования к погрешностям измерения скорости сближения ужесточаются до 0,006...0,003 м/с (при 0,5...5,0 м/с на дальностях >5 км). Для получения такой точности необходим режим измерений ЛЛС, использование которого на больших дальностях нецелесообразно (например, многократное зондирование с высокой частотой), и его следует реализовать в отдельном, «ближнем» канале.

После окончательного выбора числа каналов с учетом режима измерений следует выбрать используемую в ЛЛС компонентную базу.

Расходимость зондирующего пучка выбирается, исходя из допустимой длительности сканирования поля обзора и точности стабилизации активного КА. После этого определяются светотехнические условия при измерениях ЛЛС:

- работа только на ночной стороне орбиты;
- работа при наличии фона от освещенной Солнцем подстилающей поверхности планеты;
 - минимальный угол между направлением на Солнце и на пассивный КА;
 - работа при расположении пассивного КА на фоне диска Солнца.

Выбирается отношение сигнал/шум, обеспечивающее требуемую надежность измерений.

С учетом размеров и отражательных характеристик пассивного КА, наличия или отсутствия на нем УО составляется уравнение лазерной локации, соответствующее данному случаю. Из него определяются необходимые значения мощности лазерного источника и чувствительности ФПУ. Исходя из этих значений, а также режима измерений, определяется тип используемых лазера и фотодетектора.

Далее для каждого канала оценивается динамический диапазон измерений, и в зависимости от типа ФПУ определяется целесообразность использования в приемном тракте оптического аттенюатора.

Принимая в качестве исходных данных мощность и режим излучения лазерных источников, наличие подвижных частей

в конструкции, определяют тепловой поток от ЛЛС, показатели надежности и соответствие требованиям лазерной безопасности.

Часто возникают противоречия при выборе отдельных параметров конструкции, в результате которых не выполняется часть требований ТЗ. Требуемые значения параметров конструкции ЛЛС могут существенно отличаться при оценке по различным критериям. Использование для их нахождения обычных инженерных методов может оказаться чрезмерно трудоемким и затратным. Здесь возникает задача оптимизации, решение которой заключается в определении сочетания конструктивных параметров, обеспечивающего наилучшие характеристики ЛЛС.

Если требуемая энергетика и режим измерений ЛЛС не позволяют обеспечить безопасность зондирующего излучения, то ее можно достигнуть путем автоматического снижения мощности лазерного источника в зависимости от расстояния до пассивного КА, а также программными ограничениями энергии излучения в соответствии с алгоритмами работы СУДН активного КА в ближней зоне причаливания.

Этот же подход можно использовать при выполнении многократного поиска пассивного КА на малых дистанциях, безопасного для ФПУ. Алгоритм функционирования должен предусматривать после включения ЛЛС нахождение оптического аттенюатора в положении «полностью закрыт» и уменьшение вносимого затухания только при отсутствии принимаемого сигнала. Аналогично должна регулироваться мощность излучения лазерного источника.

Наземные испытания и отработка лазерных локационных систем

Успешное выполнение программы полета КА требует тщательной подготовки, включающей отработку бортовой аппаратуры в условиях воздействия факторов космического полета. Наземные испытания и отработка ЛЛС имеют свою специфику.

В первую очередь при испытаниях необходимо подтвердить диапазон измеряемых дальностей, скоростей и значения погрешностей измерений.

Эталонной мерой при калибровке, испытаниях и метрологической аттестации ЛЛС является полигон — трасса с набором базисных линий разной длины. Эта трасса представляет собой открытый участок местности протяженностью несколько километров со специальной инфраструктурой.

Факторами, которые следует принимать во внимание при работах с ЛЛС на полигоне, являются метеорологические условия и температурный диапазон. Выполнение измерений на трассе требует нормальных метеорологических условий (отсутствие дымки, тумана, атмосферных осадков) и определения с соответствующей точностью значения пропускания атмосферы на данной длине волны излучения.

В простейшем случае для проверки измерений максимальной дальности ЛЛС устанавливают на крыше высокого здания, а в качестве мишени (объекта измерений) используют удаленные сооружения (рис. 1).



Рис. 1. Испытания ЛЛС специалистами Jena Optronic в долине реки Заале [17]: 1 – ЛЛС; 2 – удаленные постройки, используемые в качестве мишени

В качестве мишени служат нежилые объекты, например, дымовые трубы, радиомачты, заводские цеха (категорически исключается наведение зондирующего пучка ЛЛС на людей, жилые дома, оконные проемы, транспортные средства и летательные аппараты). На малых дальностях испытания могут выполняться на небольшой закрытой трассе в помещении.

Очевидно, что методы, используемые на открытой или закрытой трассах, не применимы при испытаниях и тестовых проверках бортовой аппаратуры, уже установленной на КА.

Перспективным направлением является использование в качестве базисных линий оптического волокна для передачи сигнала от излучающей апертуры к приемной апертуре ЛЛС. Этот принцип реализован в универсальном автоматизированном коллиматорном стенде, предназначенном для поверки лазерных дальномеров, используемых в геодезии и маркшейдерском деле [18].

Известна конструкция установки для бестрассовой проверки лазерного дальномера, обеспечивающая имитацию отраженного сигнала нескольких объектов и фоновой засветки [19].

Стенд для бестрассового контроля лазерных дальномеров-биноклей, используемый для испытаний в ПАО «КМЗ им. С.А. Зверева», работает следующим образом. Лазерное излучение поступает на ФПУ стенда, к выходу которого подключен генератор задержки импульса. Для ослабления зондирующего пучка в стенде используется набор светофильтров. Задержанный импульс подается на светодиод, излучение которого направляется в приемный канал дальномера. Если дальномер исправен, то выдается информация об измеренной дальности, в противном случае возможна ошибка измерения [20].

Для испытаний лазерной аппаратуры различного назначения также применяются стационарные и полевые измерители (тестеры) [21].

Стационарные лазерные тестеры являются универсальными электрооптическими стендами, предназначенными для анализа работы лазерной аппаратуры. Проверяются энергия, длительность и частота повторения импульсов, расходимость зондирующего пучка, чувствительность ФПУ, выполняется имитация дальности в широком диапазоне и т. д. Мобильные лазерные тестеры могут использоваться как в лаборатории, так и в полевых условиях.

Для имитации Солнца в лабораторных условиях применяются ксеноновые лампы высокого давления, которые наиболее подходят по яркости, спектру и мощности излучения. Спектральный состав излучения ксеноновой лампы соответствует цветовой температуре 5 600 К, что близко к спектру излучения Солнца в видимой области [22].

В ближнем ИК-диапазоне (0,76...1,80 мкм) в качестве имитаторов фоноцелевой обстановки могут применяться электрические лампы с вольфрамовыми нитями накала.

При испытаниях ЛЛС, работающих по диффузно отраженному сигналу, может возникнуть необходимость использования мишени с геометрическими и фотометрическими характеристиками, идентичными реальному объекту.

Для характеристики отражающих свойств объекта необходимо знать закон распределения вероятностей его эффективной площади рассеяния (ЭПР), который в общем

случае определяется экспериментально. Для этого макет объекта закрепляют на поворотном столе и с помощью приемо-передающего устройства ЛЛС определяют зависимость мощности отраженного сигнала от ракурса макета. На основе этой зависимости получают статистический ряд и строят статистическую функцию по нескольким точкам, позволяющие найти численные характеристики статистического распределения ЭПР исследуемого макета объекта [23].

Так как исследования на уменьшенных макетах достаточно трудоемкие и дорогие, то широко используются расчетные методы определения ЭПР объекта. В большинстве известных моделей описание объектов сложной формы осуществляется их дроблением на отдельные характерные составляющие и аппроксимацией последних наиболее близкими к ним поверхностями первого и второго порядков. Для реальных объектов такой метод не обеспечивает приемлемой точности расчета, которую можно повысить аппроксимацией с помощью сплайнов, однако в этом случае требуется подробное геометрическое описание объекта [24].

Для расчета ЭПР объектов широко используется фасетный метод и его модификации, обеспечивающие разбиение поверхности объекта на элементарные площадки (фасеты) и расчет сигнала от облучаемых и наблюдаемых фасет. Однако использование подобных обобщенных моделей не позволяет оценить ЭПР реальных объектов на различных длинах волн, поэтому для этой цели применяются экспериментальные стенды, включающие лазеры с перестраиваемой длиной волны излучения [25].

Особую проблему представляют испытания ЛЛС на устойчивость к внешним воздействиям факторам космического полета.

В нашей стране имеется специализированная стендовая база для наземной отработки лазерных систем и изделий космической оптики с обеспечением полномасштабного моделирования внешних воздействий, на которой прошли отработку несколько поколений бортовой аппаратуры [26], а также для испытаний и экспериментальной отработки в натурных условиях лазерных систем различного назначения [27].

В настоящее время к испытательным стендам бортовых ЛЛС предъявляются требования многофункциональности и автоматизации процесса измерений. Разработчики аппаратуры предлагают различные варианты комплектации наземных стендов в зависимости от типа ЛЛС.

Для проведения испытаний ЛЛС типа скоростемера-дальномера (выполняющего измерения в одном направлении) [28] необходимо следующее оборудование:

- осциллограф и ФПУ для проверки длительности зондирующих импульсов и частоты их повторения;
- измеритель мощности (энергии) лазерного излучения для контроля энергетических параметров зондирующего пучка;
- диафрагма и штангенциркуль для измерения расходимости зондирующего пучка;
- мишень и рулетка для оценки погрешностей измерений на закрытой трассе.

При необходимости в составе испытательного стенда может быть дополнительно использован визуализатор лазерного излучения.

Для калибровки и испытаний бортовой лазерной локационной системы со сканированием по двум осям [29] разработчиками был предложен проект специализированного стенда, в состав которого входят следующие элементы:

- регулируемый источник постоянного тока;
- измеритель напряжения постоянного тока;
- измеритель силы постоянного тока;
- УО диаметром 25 мм;
- металлическая сфера диаметром 25 мм;
- измеритель мощности импульсного лазерного излучения;
- дальномер (дальность измерений 20 м);
- плоский экран с размещенными на нем ФПУ;
- электронно-счетный частотомер или цифровой осциллограф;
- устройство линейного перемещения на расстояние до 2 м и регулируемой скоростью до 1 м/с;
- плоское зеркало, имеющее размеры 1 000×1 000 мм;
- средства индивидуальной защиты для рабочего персонала.

Работа с ЛЛС должна осуществляться при строгом соблюдении требований лазерной безопасности специально подготовленным персоналом. Принимаемые меры предосторожности должны исключать попадание зондирующего пучка в органы зрения, а также на зеркально отражающие поверхности.

При необходимости персонал использует защитные очки, поглощающие приспособления в виде полотен черной плотной ткани и другие средства для обеспечения безопасности.

Заключение

В работе предложен новый порядок проведения расчетных оценок, используемый при концептуализации ЛЛС, отличающийся от известных и общепринятых подходов. Основой для него послужили имеющийся опыт разработки различных бортовых ЛЛС для перспективных КА и результаты исследований по возможностям их реализации.

На основе известного уравнения лазерной локации получены выражения для оценки динамического диапазона измерений ЛЛС при разных геометрических и отражательных характеристиках объекта.

Обобщен имеющийся опыт наземных испытаний лазерной локационной аппаратуры, который может быть использован при испытаниях и обработке бортовых ЛЛС.

Необходимо отметить, что скорой реализации бортовых ЛЛС для перспективных транспортных КА, обслуживающих космические платформы вне околоземной орбиты, также будет способствовать разработка отечественными предприятиями новой компонентной базы (лазеров, фотодетекторов), которая обеспечит лучшие характеристики по сравнению с существующими аналогами и будет устойчива к внешним воздействующим факторам в космическом полете.

Результаты исследований планируется использовать при разработке бортовых ЛЛС для перспективных КА, выполняющих транспортные задачи по обслуживанию различных космических платформ вне околоземной орбиты.

Список литературы

1. Ruel S., Luu T., Berube A. *On-orbit testing of target-less TriDAR 3D rendezvous and docking sensor // The International Symposium on Artificial Intelligent, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2010). 29 August – 1 September 2010, Sapporo, Japan.* Режим доступа: <http://robotics.estec.esa.int/i-SAIRAS/isairas2010/PAPERS/004-2775-p.pdf> (дата обращения 26.07.2015 г.).

2. English C., Okouneva G., Saint-Cyr P., Choudhuri A., Luu T. *Real-time dynamic pose estimation systems in space: lessons learned for system design and performance evaluation // International Journal of Intelligent Control and Systems.* 2011. Vol. 16. № 2. Pp. 79–96.

3. Аснис Л.А., Васильев В.П., Волконский В.Б., Ключин Е.Б., Кулясов А.Г., Мейгас К.Б., Попов Ю.В., Хинрикус Х.В., Яковлев В.В. *Лазерная дальнометрия / Под ред. Васильева В.П. и Хинрикуса Х.В. М.: Радио и связь, 1995. 256 с.*

4. Матвеев И.Н., Протопопов В.В., Троцкий И.Н., Устинов Н.Д. *Лазерная локация / Под ред. Н.Д. Устинова. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.*

5. Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. *Основы проектирования лазерных локационных систем. М.: Высшая школа, 1983. 207 с.*

6. Молебный В.В. *Оптико-локационные системы. М.: Машиностроение, 1981. 181 с.*

7. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. *Основы импульсной лазерной локации. Учебное пособие для вузов / Под ред. Рождествина В.Н. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 571 с.*

8. Назаров В.Н., Балашов И.Ф. *Энергетическая оценка импульсных лазерных дальнометров. СПбГУИТМО. 2002. 38 с. Режим доступа: http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=27 (дата обращения 04.10.2015 г.).*

9. Мишура Т.П., Платонов О.Ю. *Проектирование лазерных систем. Учебное пособие. СПб.: ГУАП, 2006. 98 с.*

10. Вильнер В.Г., Волобуев В.Г., Казаков А.А., Рябокуль Б.К. *Пути достижения предельной точности лазерного скоростемера // Мир измерений. 2010. № 7. С. 17–21.*

11. Вильнер В.Г., Волобуев В.Г., Ларюшин А.И., Рябокуль А.Б. *Достоверность измерений импульсного лазерного дальнометра // Фотоника. 2013. № 3. С. 42–60.*

12. Старовойтов Е.И. *Бортовые лазерные локационные системы космических аппаратов. Учебное пособие. Королев: ОАО «РКК «Энергия», 2015. 160 с.*

13. Фобос-Грунт: проект космической экспедиции. В 2 т. М.: ООО «Полстар», 2011. Т. 1. 237 с.

14. Старовойтов Е.И., Зубов Н.Е. *Применение лазерного высотомера в качестве резервного измерителя при сближении космических аппаратов на окололунной орбите // Космическая техника и технологии. 2015. № 3(10). С. 60–67.*

15. Старовойтов Е.И., Зубов Н.Е. *Прикладные вопросы разработки бортовой лазерной локационной аппаратуры // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 9. С. 81–105. DOI: 10.7463/0915.0811999. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/811999.html> (дата обращения 27.10.2015 г.).*

16. Поляков В.М., Покровский В.П., Сомс Л.Н. *Лазерный передающий модуль с переключаемой диаграммой направленности для дальнометра космического аппарата // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 10. С. 4–9.*

17. Moebius B., Pfennigbauer M., Pereira do Carmo J. *Imaging LIDAR technology.*

Development of a 3D-LIDAR elegant breadboard for rendezvous & docking, test results, prospect to future sensor application. Режим доступа: http://www.congrexprojects.com/custom/icso/Presentations%20Done/Session%203a/04_Moebius.pdf (дата обращения 14.10.2014 г.).

18. Виноградов Н.С., Воронцов Е.А. Оптоволоконный базис для поверки дальномерных блоков тахеометра // Научно-технический вестник СПбГУИТМО. 2011. Вып. 3(7). С. 15–19.

19. Патент RU 2541677 С2. Российская Федерация. Установка для бестрассовой проверки лазерного дальномера. Турунтаев И.В., Кощавцев Н.Ф., Колесник А.В., Шустов Н.М.; заявитель и патентообладатель – ООО «Курранты»; заявка № 2013119404/28; приоритет от 26.04.2013 г. // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 31.

20. Абрамов А.И., Бельский А.Б., Зборовский А.А. Разработка лазерных дальномеров-биноклей на Красногорском заводе имени С.А. Зверева // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 8. С. 18–21.

21. *CI-Systems. Electro-optical test systems. Laser testing.* Режим доступа: <http://www.ci-systems.com/laser-testing> (дата обращения 11.05.2015 г.).

22. Ивандиков Я.М. Оптические приборы наведения и ориентации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.

23. Федоров Б.Ф. Лазерные приборы и системы летальных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 268 с.

24. Непогодин И.А. Критерии и метод оценки информативности признаков объектов в задачах лазерной локации // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 55–64.

25. Степанов А.В., Тимов А.Л. Метрологическое обеспечение исследований отражательных характеристик объектов в лазерной локации // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/341.html> (дата обращения 06.11.2015 г.).

26. ОАО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения». Режим доступа: <http://www.niiki.ru/pages/a-ob.html> (дата обращения 08.05.2015 г.).

27. ФКП «Государственный лазерный полигон «Радуга». Режим доступа: <http://trassa.org/> (дата обращения 08.08.2016 г.)

28. Старовойтов Е.И., Зубов Н.Е., Ивашов В.В., Никульчин А.В. Исследование эффективности и оптимизация параметров лазерного локационного прибора для измерения скорости сближения космических аппаратов // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана). 2014. № 6. С. 247–269. DOI: 10.7463/0614.0712240. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/712240.html> (дата обращения 26.07.2015 г.).

29. Грязнов Н.А., Панталеев С.М., Иванов А.Е., Кочкарев Д.А., Куликов Д.С. Высокопроизводительный метод измерений координат объектов в условиях космического пространства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2(171). С. 197–202.

Статья поступила в редакцию 21.03.2016 г.

Reference

1. Ruel S., Luu T., Berube A. *On-orbit testing of target-less TriDAR 3D rendezvous and docking sensor. The International Symposium on Artificial Intelligent, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2010). 29 August – 1 September 2010, Sapporo, Japan. Available at: <http://robotics.estec.esa.int/i-SAIRAS/isairas2010/PAPERS/004-2775-p.pdf> (accessed 26.07.2015).*

2. English C., Okouneva G., Saint-Cyr P., Choudhuri A., Luu T. *Real-time dynamic pose estimation systems in space: lessons learned for system design and performance evaluation. International journal of intelligent control and systems, 2011, vol. 16, no. 2, pp. 79–96.*

3. Asnis L.A., Vasil'ev V.P., Volkonskii V.B., Klyushin E.B., Kulyasov A.G., Meigas K.B., Popov Yu.V., Khinrikus Kh.V., Yakovlev V.V. *Lazernaya dal'nometriya [Laser ranging]. Ed. Vasil'ev V.P., Khinrikus Kh.V. Moscow, Radio i svyaz' publ., 1995. 256 p.*

4. Matveev I.N., Protopopov V.V., Troitskii I.N., Ustinov N.D. *Lazernaya lokatsiya [Laser ranging]. Ed. Ustinov N.D. Moscow, Mashinostroenie publ., 1984. 272 p.*

5. Malashin M.S., Kaminskii R.P., Borisov Yu.B. *Osnovy proektirovaniya lazernykh lokatsionnykh system [Fundamentals of design of the laser radar systems]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1983. 207 p.*

6. Molebnyi V.V. *Optiko-lokatsionnye sistemy [Optical-radar systems]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981. 181 p.*

7. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoi lazernoi lokatsii. Uchebnoe posobie dlya vuzov [Basics of the pulsed laser radar. Textbook for universities]. Ed. Rozhdestvin V.N. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman publ., 2010. 571 p.*

8. Nazarov V.N., Balashov I.F. *Energeticheskaya otsenka impul'snykh lazernykh dal'nomerov* [The energy assessment of the pulsed laser rangefinders]. Saint-Petersburg, SPbGUITMO publ., 2002. 38 p. Available at: http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=27 (accessed 04.10.2015).
9. Mishura T.P., Platonov O.Yu. *Proektirovanie lazernykh sistem. Uchebnoe posobie* [Design of laser systems. Textbook]. Saint-Petersburg, GUAP publ., 2006. 98 p.
10. Vil'ner V.G., Volobuev V.G., Kazakov A.A., Ryabokul' B.K. *Puti dostizheniya predel'noi tochnosti lazernogo skorostemera* [Ways to achieve ultimate accuracy of the laser velocimeter]. *Mir izmerenii*, 2010, no. 7, pp. 17–21.
11. Vil'ner V.G., Volobuev V.G., Laryushin A.I., Ryabokul' A.B. *Dostovernost' izmerenii impul'snogo lazernogo dal'nomera* [The measurement reliability of the pulsed laser rangefinder]. *Fotonika*, 2013, no. 3, pp. 42–60.
12. Starovoitov E.I. *Bortovye lazernye lokatsionnye sistemy kosmicheskikh apparatov. Uchebnoe posobie* [The onboard laser radar systems of spacecraft. Text-book]. Korolev, OAO «RKK «Energiya» publ., 2015. 160 p.
13. *Fobos-Grunt: proekt kosmicheskoi ekspeditsii. V 2 t.* [Fobos-Grunt: space expedition project. In 2 vol.]. Moscow, OOO «Polstar» publ., 2011. Vol. 1, 237 p.
14. Starovoitov E.I., Zubov N.E. *Primenenie lazernogo vysotomera v kachestve rezervnogo izmeritelya pri sblizhenii kosmicheskikh apparatov na okololunnoi orbite* [Using laser altimeter as a backup measuring device during spacecraft rendezvous in lunar orbit]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 3(10), pp. 60–67.
15. Starovoitov E.I., Zubov N.E. *Prikladnye voprosy razrabotki bortovoi lazernoi lokatsionnoi apparatury* [Applied problems of the onboard laser radar equipment development]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman*, 2015, no. 9, pp. 81–105. DOI: 10.7463/0915.0811999. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/811999.html> (accessed 27.10.2015).
16. Polyakov V.M., Pokrovskii V.P., Soms L.N. *Lazernyi peredayushchii modul' s pereklyuchaemoi diagrammoi napravlenosti dlya dal'nomera kosmicheskogo apparata* [The laser transmitting module with a switchable directional pattern for the spacecraft rangefinder]. *Opticheskii zhurnal*, 2011, vol. 78, no. 10, pp. 4–9.
17. Moebius B., Pfennigbauer M., Pereira do Carmo J. *Imaging LIDAR technology. Development of a 3D-LIDAR elegant breadboard for rendezvous & docking, test results, prospect to future sensor application.* Available at: http://www.congrexprojects.com/custom/icso/Presentations%20Done/Session%203a/04_Moebius.pdf (accessed 14.10.2014).
18. Vinogradov N.S., Vorontsov E.A. *Optovolokonnyi bazis dlya poverki dal'nomernykh blokov takheometra* [The optical fiber basis for checking the tachometer range units]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik SPbGUITMO*, 2011, issue 3(7), pp. 15–19.
19. Patent RU 2541677 C2. Rossiiskaya Federatsiya. *Ustanovka dlya bestrassovoi proverki lazernogo dal'nomera* [Facilities for routeless checking the laser rangefinder]. Turuntaev I.V., Koshchavtsev N.F., Kolesnik A.V., Shustov N.M.; the applicant and the patent owner – OOO «Kuranty»; application 2013119404/28; priority of 26.04.2013. *Izobreteniya. Poleznye modeli*, 2014, no. 31.
20. Abramov A.I., Bel'skii A.B., Zborovskii A.A. *Razrabotka lazernykh dal'nomerov-binoklei na Krasnogorskoi zavode im. S.A. Zvereva* [The development of laser rangefinders-binoculars at the Krasnogorsk plant named after S.A. Zverev]. *Opticheskii zhurnal*, 2009, vol. 76, no. 8, pp. 18–21.
21. CI-Systems. *Electro-optical test systems. Laser testing.* Available at: <http://www.ci-systems.com/laser-testing> (accessed 11.05.2015).
22. Ivandikov Ya.M. *Opticheskie pribory navedeniya i orientatsii kosmicheskikh apparatov* [Optical instruments for spacecraft guidance and orientation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1979. 208 p.
23. Fedorov B.F. *Lazernye pribory i sistemy letal'nykh apparatov* [Laser devices and systems of flight vehicles]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1979. 268 p.
24. Nepogodin I.A. *Kriterii i metod otsenki informativnosti priznakov ob'ektov v zadachakh lazernoi lokatsii* [The assessment criteria and method of the object features informativeness in the laser ranging tasks]. *Opticheskii zhurnal*, 2007, vol. 74, no. 1, pp. 55–64.
25. Stepanov A.V., Titov A.L. *Metrologicheskoe obespechenie issledovaniy otrazhatel'nykh kharakteristik ob'ektov v lazernoi lokatsii* [Metrological support of studying the reflection characteristics of objects in laser ranging]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii. Elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie.* Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/341.html> (accessed 06.11.2015).
26. OAO «Nauchno-issledovatel'skii institut optiko-elektronnogo priborostroeniya» [Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering]. Available at: <http://www.niiki.ru/pages/a-ob.html> (accessed 08.05.2015).

27. FKP «Gosudarstvennyi lazernyi poligon «Raduga» [FSP State Laser Range Raduga]. *Rezhim dostupa: <http://trassa.org> (accessed 08.08.2016).*

28. Starovoitov E.I., Zubov N.E., Ivashov V.V., Nikul'chin A.V. *Issledovanie effektivnosti i optimizatsiya parametrov lazernogo lokatsionnogo pribora dlya izmereniya skorosti sblizheniya kosmicheskikh apparatov* [Study of efficiency and optimization of the laser radar parameters to measure the spacecraft approach velocity]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana, 2014, no. 6, pp. 247–269. DOI: 10.7463/0614.0712240. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/712240.html> (accessed 26.07.2015).*

29. Gryaznov N.A., Pantaleev S.M., Ivanov A.E., Kochkarev D.A., Kulikov D.S. *Vysokoproizvoditel'nyi metod izmerenii koordinat ob»ektov v usloviyakh kosmicheskogo prostranstva* [A high-performance measurement method of the object coordinates in the outer-space conditions]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU, 2013, no. 2(171), pp. 197–202.*