

Анализ надежности лазерных локационных систем для управления движением космических аппаратов

02, февраль 2014

DOI: 10.7463/0214.0699720

Старовойтов Е. И.

УДК 629.7.05

Россия, ОАО "РКК «Энергия» им. С.П. Королева"

evgstarovojtov@yandex.ru

Введение

Осуществление экспедиций на Луну и другие планеты пилотируемыми космическими аппаратами (КА) подразумевает выполнение операций управляемого спуска взлетно-посадочного комплекса с последующим стартом, после которого осуществляется сближение и стыковка с орбитальным КА. Для управления этими операциями могут быть использованы лазерные локационные системы (ЛЛС), в том числе лазерные высотомеры [1]. ЛЛС определяют дальность до пассивного КА и скорость сближения, а лазерные высотомеры обеспечивают измерение высоты над поверхностью планеты и скорости снижения.

Полеты вне околоземной орбиты требуют высокой надежности работы всех систем КА, обеспечивающих выполнение программы полета и безопасное возвращение на Землю. Таким образом, оценка надежности ЛЛС в зависимости от режима работы и поиск способов ее повышения являются актуальными.

Реализация бортовых ЛЛС может осуществляться в двух основных вариантах: с использованием оптико-механического сканера и без него.

ЛЛС без оптико-механического сканирования, часто называемые лазерные дальнометры (или лазерные высотомеры), могут проводить измерения только в одном определенном направлении и требуют предварительного наведения на объект измерения, для чего может потребоваться разворот активного КА.

Оптико-механический сканер, включающий подвижные элементы, обеспечивающие отклонение зондирующего пучка (дефлекторы и сканаторы), позволяет ЛЛС получать 3D-изображение объекта измерений. В настоящее время интенсивно развивается технология 3D Flash

Ladar, позволяющая отказаться от сканирования [2]. Недостатком таких систем в настоящее время является ограниченная дальность обнаружения пассивного КА (в среднем около 500 м).

При широком диапазоне измеряемых дальностей для снижения мощности принятого сигнала применяется оптический аттенюатор, как в конструкции лазерного высотомера, предназначенного для управления спуском автоматического КА на поверхность Фобоса [3]. Оптический аттенюатор может иметь электромеханический привод.

Необходимо отметить, что использование подвижных частей в конструкции ЛЛС отрицательно влияет на надежность аппаратуры. Трение взаимодействующих деталей в условиях космического вакуума приводит к их быстрому разрушению и адгезии [4]. Даже при выполнении специальных мер не удастся обеспечить продолжительную эксплуатацию подвижных частей, а герметизация прибора не всегда возможна из-за ограничений на массово-геометрические характеристики КА.

Для повышения надежности ЛЛС были разработаны способы обнаружения пассивного КА с использованием ЛЛС без оптико-механического сканирования [5,6], за счет движения активного КА. Они основаны на использовании «ножевой» диаграммы направленности зондирующего излучения ЛЛС с различной шириной в меридиональной и сагиттальной плоскостях и многоэлементного линейного фотоприемного устройства. Представляет интерес количественная оценка повышения надежности ЛЛС за счет применения разработанных способов.

1 Методика анализа надежности ЛЛС

Для оценки надежности допустим, что механические элементы конструкции ЛЛС, обладают достаточными запасами прочности, что обеспечивает пренебрежимо малую вероятность их отказа. Поэтому вероятность безотказной работы (ВБР) целесообразно оценивать только для лазера, электронных и электромеханических элементов и узлов.

Анализ структуры распространенных вариантов ЛЛС показывает, что они не имеют избыточности и с точки зрения надежности все элементы включены последовательно, за исключением межблочных электрических соединений и каналов связи (см. рис. 1).

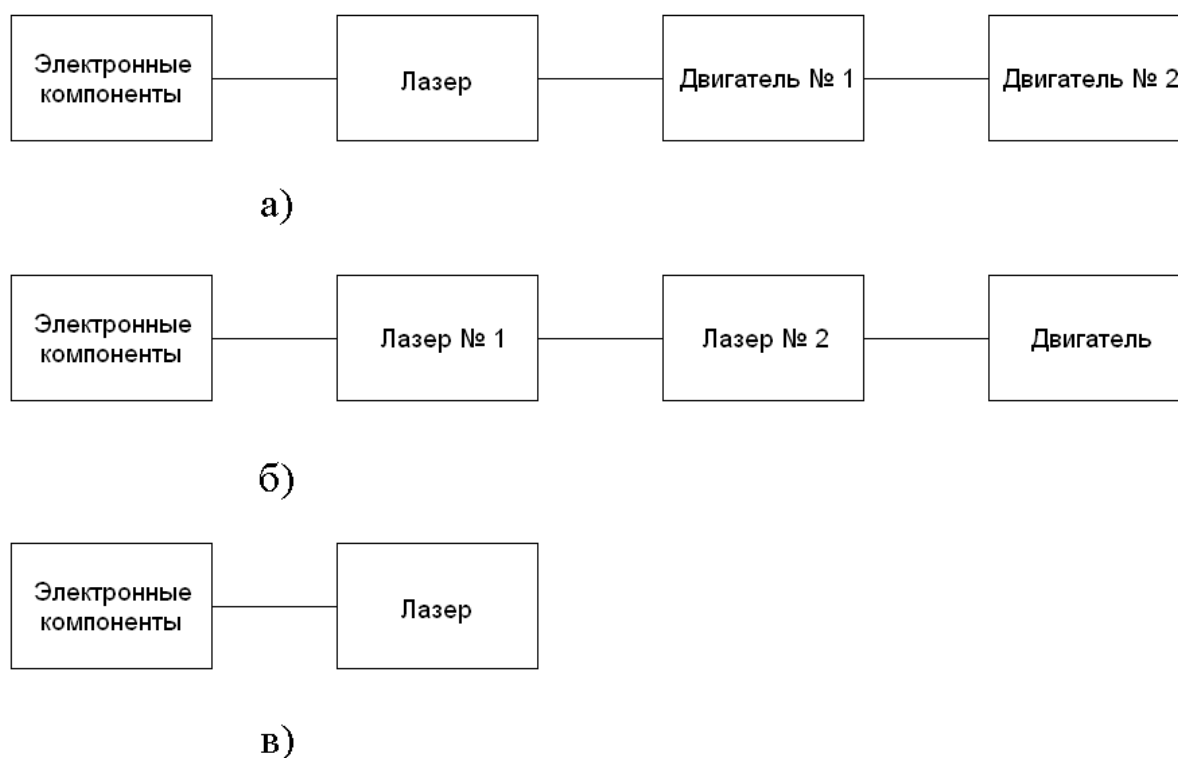


Рис. 1. Структурные схемы надежности разных вариантов ЛЛС:

а) с оптико-механическим сканированием по двум осям; б) без сканирования и включающих аттенуатор с электромеханическим приводом; в) без подвижных элементов в конструкции

В блок «Электронные компоненты» включены все электронные компоненты, модули и устройства, входящие в состав ЛЛС, а также межмодульные и межблочные соединения.

На ранних этапах жизненного цикла сложных технических систем различного целевого назначения в условиях отсутствия статистической информации об их отработке и испытаниях оценку ВБР получают расчетным методом и полагают, что оно распределено по экспоненциальному закону. В этом случае показатели надежности описываются следующими выражениями [7].

Значение ВБР для изделия (прибора или его элемента) равно:

$$P = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (1)$$

где: λ – поток интенсивности отказов изделия, 1/ч; а $t \in [t_0, T_f]$ – оцениваемый период времени активной работы, ч; t_0 – начало работы изделия; T_f – окончание работы изделия.

Интенсивность отказов изделия равна

$$\lambda = \frac{1}{\hat{O}_i}, \quad (2)$$

где: T_n – наработка до отказа для данного изделия, ч.

Значение потока интенсивности отказов для ЛЛС в целом определяется выражением:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \hat{E}_i \cdot \lambda_i, \quad (3)$$

где: n – число элементов; K_3 – обобщенный эксплуатационный коэффициент; λ_i – интенсивность отказов i -го элемента, 1/ч.

Для расчета ВБР использованы максимальные эксплуатационные значения интенсивностей отказов для каждой группы типовых элементов, используемых в конструкции ЛЛС. Значение эксплуатационного коэффициента принято равным $K_3 = 1,5$, что соответствует эксплуатации изделия в условиях орбитального космического полета [7].

В значительной степени надежность ЛЛС определяется надежностью лазерного источника и режимом его работы. В ЛЛС, разрабатываемых в настоящее время используются твердотельные лазеры (ТТЛ), полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) и волоконные лазеры (ВЛ) [8].

Для оценки надежности выбраны два типа ЛЛС. Первый вариант представляет собой ЛЛС без оптико-механического сканирования, имеющую ближний и дальний каналы, в состав которой входят ТТЛ и непрерывный полупроводниковый ЛД, а также аттенюатор с электромеханическим приводом. Дальний канал предназначен для измерений времяпролетным методом дальности и скорости сближения на дальностях 0,2...5 км, ближний канал обеспечивает измерения до касания стыковочного узла пассивного КА или поверхности планеты. Такая концепция может быть реализована в дальномере-скоростемере для управления сближением КА или высотомере для управления спуском.

Во втором случае рассматривается сканирующая по двум осям ЛЛС на основе ВЛ или ТТЛ, диапазон измеряемых дальностей которой превышает сотни километров. Она может использоваться для измерения дальности, скорости до пассивного КА, определения его ориентации, измерения углов взаимного разворота активного и пассивного КА, инспекции и идентификации некооперируемых объектов, а также для картографирования поверхности планеты и выбора места посадки.

Для накачки ТТЛ и ВЛ используют ЛД – так называемую диодную накачку. Для оценки надежности ЛЛС далее примем еще два допущения.

Первое заключается в том, что ресурс ТТЛ определяется количеством импульсов ЛД накачки, при этом ресурс других элементов конструкции ТТЛ (модулятора, резонатора, активного элемента) в нормальных условиях эксплуатации составляет значительно большие величины.

Второе состоит в том, что ресурс ЛД накачки не зависит от частоты их повторения. Деграация ЛД имеет температурную зависимость, которую часто аппроксимируют экспоненциальной функцией [9]. При изменении температуры имеет место сдвиг линии генерации, неприемлемый в блоке диодной накачки (спектр излучения ЛД должен быть согласован с узкими полосами поглощения активных ионов), который часто имеет собственную систему термостабилизации. Поэтому при оценке ресурса ЛД накачки будем оценивать только количество импульсов излучения.

Ресурс сборок ЛД для накачки ТТЛ составляет не менее $N_u = 10^8 \dots 10^9$ импульсов излучения [10,11].

Тогда интенсивность отказов ЛД накачки оценим по формуле

$$\lambda = \frac{f_i \cdot 3600}{N_e}, \quad (4)$$

где: f_i – частота повторения импульсов накачки.

Примем $N_u = 10^9$, тогда при средней частоте повторения импульсов накачки $f_i = 10$ Гц интенсивность отказов составит $\lambda_i = 3,6 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

Для серийно выпускаемых полупроводниковых ЛД, излучающих в непрерывном режиме, в настоящее время ресурс составляет 10000 ч (соответствующий снижению выходной оптической мощности не более чем на 20 %) [12].

ВЛ, применяемые в настоящее время для обработки материалов, по сравнению с ТТЛ имеют больший ресурс источника накачки – свыше 50000 ч (при частотах генерации 20...100 кГц, количество импульсов не указывается) [13]. Из-за многих преимуществ рассматривается применение ВЛ в перспективных ЛЛС в качестве источника излучения [14].

Для оценки надежности электронных компонентов использованы максимальные эксплуатационные значения интенсивностей отказов для нескольких групп типовых элементов. Минимальная наработка до отказа электродвигателей принята 20000 ч [15].

Интенсивность отказов для разных блоков ЛЛС представлена в таблице 1.

Табл. 1

Интенсивность отказов для разных блоков ЛЛС

Блок	$\lambda, 1/\text{ч}$
Электронные компоненты	$3,5 \cdot 10^{-6}$
Двигатель	$5,0 \cdot 10^{-5}$
ТТЛ с диодной накачкой ($f_n = 10$ Гц)	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Полупроводниковый ЛД (непрерывный)	$1,0 \cdot 10^{-4}$
ВЛ	$2,0 \cdot 10^{-5}$

2 Оценка надежности двух типов ЛЛС

При проектировании ЛЛС возникает проблема оценки надежности в зависимости от режима излучения, определяемого в свою очередь требованиями к погрешностям измерений дальности и скорости.

Оценим надежность двухканальной ЛЛС в зависимости от погрешностей измерения дальности и скорости. Структурная схема надежности представлена на рис. 1, б. Влияние вакуума на подвижные пары не учитываем, принимая, что ЛЛС имеет герметичный оптико-механический блок.

В дальнем канале реализован времяпролетный метод измерения дальности с использованием ТТЛ. Измерения скорости осуществляются конечно-разностным или дифференциальным методом, который описывается выражением

$$v = \frac{D_1 - D_2}{\Delta t}, \quad (5)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1, \quad (6)$$

где: D_1, D_2 – измеренные значения дальности в моменты времени t_1, t_2 .

Из выражения (5) следует, что погрешность измерения скорости σ_v определяется погрешностями измерения дальности σ_D и временного интервала σ_t между измерениями.

Формальным образом это можно представить в виде

$$\frac{\sigma_v^2}{v^2} = 2 \cdot \frac{\sigma_D^2}{v^2 \Delta t^2} + \frac{\sigma_{\Delta t}^2}{\Delta t^2}, \quad (7)$$

Предположим, что σ_D не зависит от дальности и что $\sigma_t \ll \sigma_D$. Пренебрегая вторым членом в выражении (7), преобразуем его к виду

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_D}{\Delta t^2}. \quad (8)$$

Для времяпролетного метода измерения дальности обычно $\sigma_D = 3,5 \dots 10$ м [16]. Если в дальнем канале ЛЛС необходимо обеспечить $\sigma_v < 1$ м, то в этом случае возникают существенные трудности.

Из выражения (5) следует, что точность измерений можно повысить за счет увеличения промежутка времени Δt между измерениями. Но это приведет к снижению частоты выдачи результатов измерений в систему управления движением КА, что может быть неприемлемо на близких дистанциях.

Другим путем является повышение точности измерений дальности за счет использования вместо одиночного зондирующего импульса пачки из N импульсов. Принимая, что все N зондирующих импульсов независимы, можно усреднить результаты измерения по каждому импульсу. Тогда выражение для точности измерения скорости принимает вид

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \frac{\sigma_D}{\Delta t^2}, \quad (9)$$

откуда

$$N = 2 \cdot \left(\frac{\sigma_D}{\sigma_v \cdot \Delta t^2} \right)^2. \quad (10)$$

Таким образом, большое значение σ_D компенсируется за счет увеличения количества N импульсов при зондировании и, соответственно, частоты их повторения. При этом, как следует из выражения (4), возрастает интенсивность отказов диодов накачки ТТЛ.

Для анализа влияния точности измерений на надежность ЛЛС примем значения погрешности измерения дальности равными $\sigma_D = 3,5; 5$ и 10 м соответственно. Продолжительность времени активной работы ЛЛС примем равной $t = 3$ ч.

На рис. 2 представлена зависимость ВБР от σ_v для трех значений σ_D при $\Delta t = 1$ с.

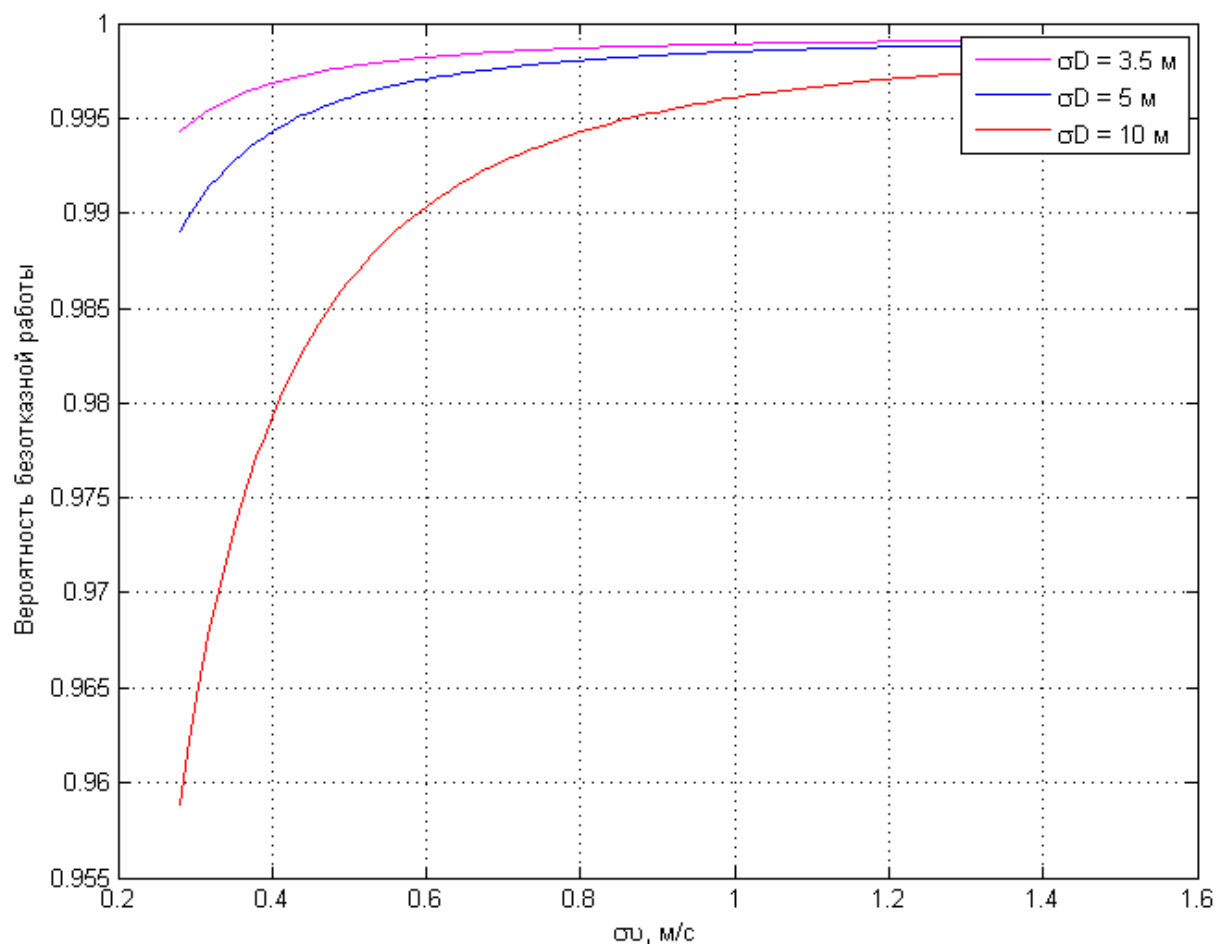


Рис. 2. Зависимость ВБР от погрешности измерения скорости для трех значений погрешности измерения дальности

Анализ зависимостей на рис. 2 показывает, что для погрешности измерения дальности времяпролетным методом $\sigma_D = 10$ м обеспечивается погрешность измерения скорости $\sigma_v = 0,6$ м/с при ВБР = 0,99. Для получения $\sigma_v < 0,5$ м/с, приходится либо допустить снижение ВБР < 0,99, либо уменьшить начальную погрешность измерения дальности; погрешностям измерения $\sigma_D = 3,5 \dots 5$ м, соответствует ВБР $\geq 0,995$.

Для сканирующей по двум осям ЛЛС, предназначенной для измерений дальностей свыше нескольких километров, частота повторения зондирующих импульсов определяется измеряемым расстоянием. Выбор лазерного источника обычно выполняется на основе оценки энергетики и теплового режима [8], надежность при этом не оценивается.

Очевидно, что с точки зрения управления движением КА желательно обеспечить быстрый просмотр области целеуказания для обнаружения пассивного КА и своевременного обновления информации. То есть, для обеспечения быстрого просмотра области целеуказания на близких дистанциях необходимо увеличивать частоту повторения зондирующих импульсов.

Однако при последовательном сканировании узким излучающим полем, совмещенным с мгновенным полем зрения фотоприемника, максимальная частота повторения зондирующих импульсов не должна превышать величину

$$f_e = \frac{c}{2D_{\max}}, \quad (11)$$

где: c – скорость света вакууме; $D_{\max}$ – максимальная измеряемая дальность.

На рис. 3. представлены зависимости от дальности частоты повторения зондирующих импульсов и ВБР для ЛЛС на основе ТТЛ. Влияние вакуума не учитывается (в случае использования герметичного оптико-механического блока).

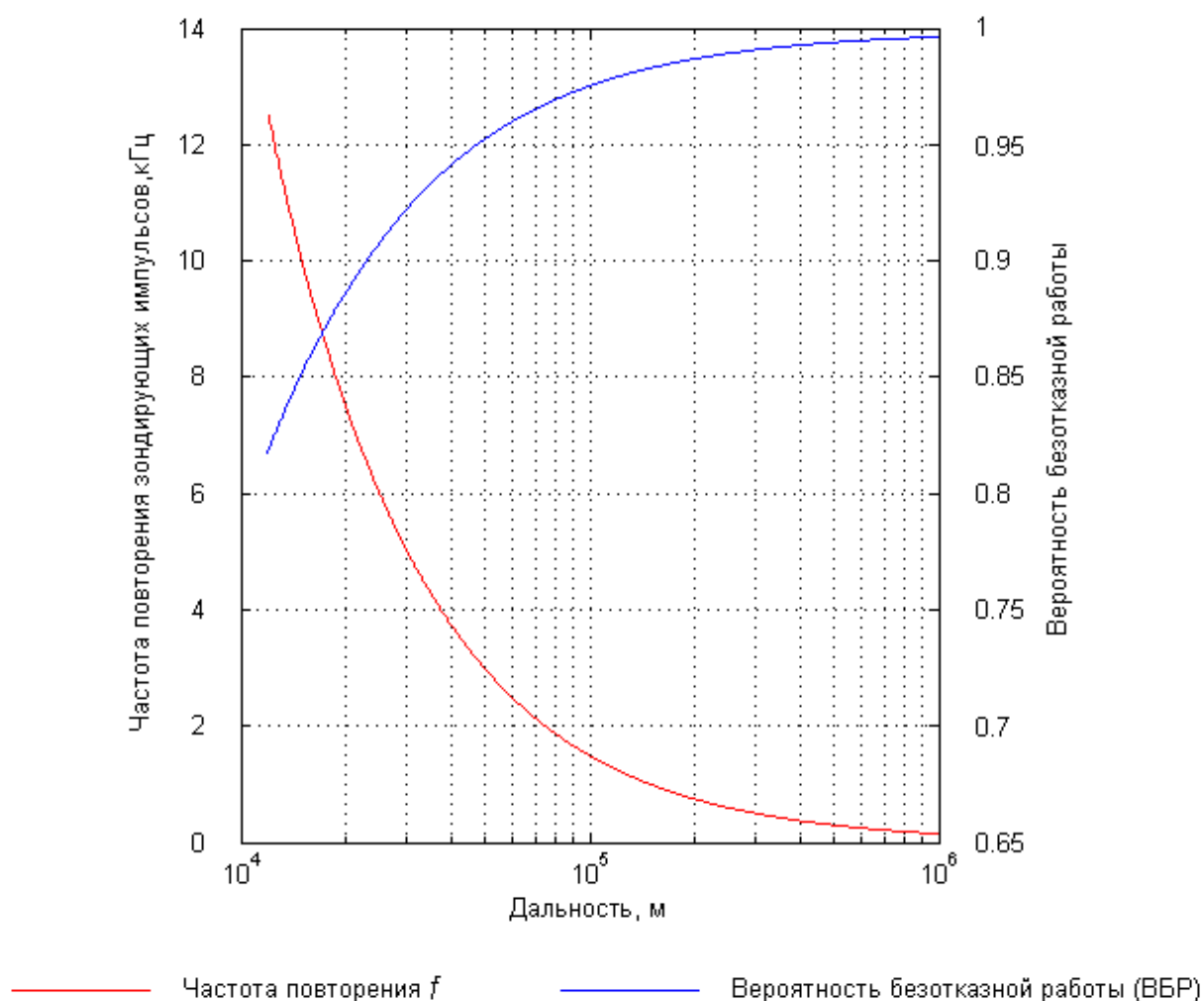


Рис. 3. Зависимости частоты повторения зондирующих импульсов и ВБР от дальности для ЛЛС на основе ТТЛ

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3 показывает, что значительное снижение надежности ТТЛ связано со сканированием области целеуказания с высокой частотой. В этом случае очевидны преимущества ВЛ: ресурс 50000 ч при $f_u = 20 \dots 100$ кГц. Ограниченная энергия импульса ВЛ (до 0,5 мДж [13]) компенсируется небольшой дальностью локации. С увеличением дальности и, следовательно, энергии зондирующих импульсов, падает допустимая частота их повторения, что позволяет использовать ТТЛ.

Таким образом, для локации на дистанциях менее 10 км следует использовать ВЛ, а на дистанциях свыше 10 км – ТТЛ, что согласуется с результатами энергетических расчетов [8].

3 Влияние подвижных элементов на надежность ЛЛС

Следующим вопросом является влияние подвижных элементов на надежность ЛЛС.

Рассмотрим надежность ЛЛС с герметичным объемом и с подвижными парами, находящимися в условиях космического вакуума.

Для подвижных пар примем наработку до отказа равной $T_n = 500$ ч. Оценим, как изменится ВБР при реализации разработанных способов обнаружения пассивного КА [5,6]. Примем допущение, что многоэлементное линейное фотоприемное устройство существенно не изменяет показатели надежности.

Для ЛЛС с герметичным оптико-механическим блоком одним из путей повышения надежности может быть резервирование электродвигателей. На практике, из-за массогабаритных ограничений преимущественно используется однократное резервирование – дублирование [17].

Структурные схемы надежности представлены на рис. 4.

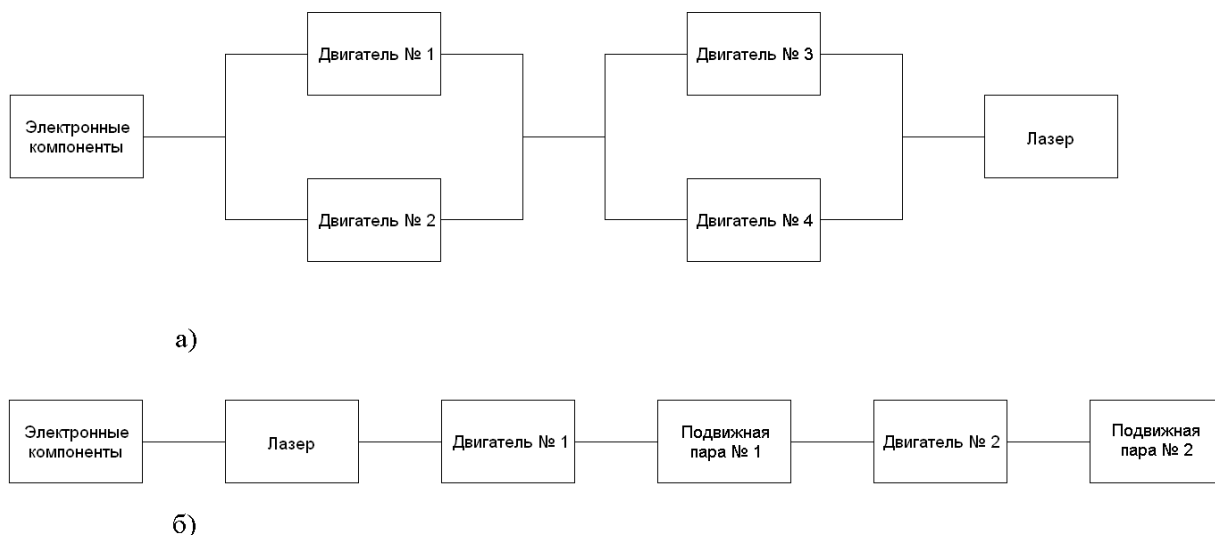


Рис. 4. Структурные схемы надежности разных вариантов ЛЛС с оптико-механическим сканированием по двум осям: а) с герметизацией оптико-механического блока и дублированием электродвигателей; б) без герметизации оптико-механического блока

При оценке надежности резервированной системы предполагается, что переключение с отказавшего элемента на резервный осуществляется мгновенно и безошибочно. При параллельном резервировании электродвигателей, ВБР каждого комплекта будет равна [17]

$$P = 1 - (1 - P_d)^2, \quad (12)$$

где: P_d – ВБР для отдельного электродвигателя.

ВБР для всей последовательно-параллельной схемы соединения элементов (см. рис. 4, а) будет определяться выражением

$$P = P_э \cdot (1 - (1 - P_d)^2) \cdot P_л, \quad (13)$$

где: $P_э$, $P_л$ – ВБР для электронных компонентов, электродвигателей и лазера, определяемые по формуле (1).

При отказе от оптико-механического сканирования и перехода к «ножевой» диаграмме зондирующего излучения целесообразно рассмотреть вариант замены ВЛ на ТТЛ по следующим

причинам.

Во-первых, в «ножевой» диаграмме меньше плотность излучения в сечении пучка и потребуется увеличение энергии зондирующих импульсов. Во-вторых, увеличение в одной плоскости ширины диаграммы зондирующего излучения до углового размера области целеуказания позволяет снизить частоту повторения зондирующих импульсов. Если для полного обзора квадратной области целеуказания требуется $n \times n$ зондирующих импульсов, то с использованием такой диаграммы излучения будет достаточно всего n импульсов.

В ЛЛС со сканированием по двум осям используются частоты повторения зондирующих импульсов до $f_u = 10$ кГц [14]. Тогда при реализации данных способов можно снизить частоту повторения зондирующих импульсов до значения $f_u = 100$ Гц.

Значения ВБР для разных вариантов ЛЛС представлены в таблице 2.

Табл. 2

ВБР для разных вариантов сканирующей по двум осям ЛЛС

Вариант ЛЛС	$\lambda_z, 1/ч$	ВБР
Герметичный оптико-механический блок	$1,85 \cdot 10^{-4}$	0,9994
Герметичный оптико-механический блок с дублированием электродвигателей	$9,15 \cdot 10^{-6}$	0,9999
Негерметичный оптико-механический блок	$3,18 \cdot 10^{-3}$	0,9905
При исключении электродвигателей	$3,52 \cdot 10^{-5}$	0,9999
При исключении электродвигателей и замене ВЛ на ТТЛ ($f_n = 100$ Гц)	$5,92 \cdot 10^{-5}$	0,9998

Данные в таблице 2 показывают, что надежность ЛЛС с герметичным оптико-механическим блоком составляет 0,9994, а с негерметичным оптико-механическим блоком 0,9905.

При исключении обоих электродвигателей и подвижных элементов из состава сканирующей ЛЛС надежность возрастает до 0,9999 (на 0,05 % и 0,95 % соответственно). Такой же результат достигается при дублировании обоих электродвигателей. Если кроме исключения электродвигателей и подвижных элементов заменить ВЛ на ТТЛ, то надежность ЛЛС составит 0,9998 (увеличится на 0,04 % и 0,93 % соответственно).

Таким образом, исключение подвижных частей оправдано при невозможности изготовления герметичного оптико-механического блока ЛЛС. При использовании герметичного оптико-механического блока такое же повышение надежности достигается за счет дублирования электродвигателей.

Заключение

Проведен анализ основных факторов, оказывающих влияние на надежность двух типов ЛЛС, что позволило исследовать влияние на ВБР источника излучения и наличия подвижных частей в ее конструкции. Основное допущение, принятое для оценки надежности, состоит в том, что ресурс ТТЛ определяется количеством импульсов диодов накачки.

Исследовано влияние на ВБР режима излучения ТТЛ в дальнем канале, при измерении скорости сближения с пассивным КА дифференциальным методом.

Установлено, что для средней погрешности измерения дальности 10 м и скорости 0,6 м/с обеспечивается ВБР = 0,99. При снижении погрешности измерения скорости до 0,5 м/с либо снижается ВБР < 0,99, либо необходимо уменьшить начальную погрешность измерения дальности до 3,5...5 м, соответствующую ВБР $\geq 0,995$.

Для сканирующей по двум осям ЛЛС получена зависимость от дальности максимальной частоты повторения зондирующих импульсов, на основе которой определена ВБР для варианта с использованием ТТЛ.

Исследовано влияние подвижных элементов на надежность сканирующей ЛЛС с герметичным объемом и с подвижными парами, находящимися в условиях вакуума.

В результате установлено, что исключение подвижных частей оправдано при невозможности изготовления герметичного оптико-механического блока ЛЛС. В этом случае ВБР ЛЛС увеличивается от 0,99 до 0,9999. При герметизации оптико-механического блока такое же повышение надежности достигается за счет резервирования электродвигателей дублированием.

Автор выражает благодарность д.т.н. В.И. Великоиваненко и к.ф.-м.н. Н.А. Грязнову за ценные замечания и советы по данной работе.

Список литературы

1. Pereira do Carmo J., Moebius B., Pfennigbauer M. Imaging LIDARs for Space Applications // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 7061. Art no. 70610J-1. DOI: [10.1117/12.793701](https://doi.org/10.1117/12.793701)

2. Christian J.A., Hinkel H., D'Souza C.N., Mauire S., Patangan M. The Sensor Test for Orion RelNav Risk Mitigation (STORRM) Development Test Objective. Режим доступа: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110013437_2011014090.pdf (дата обращения 01.01.2014).
3. Фобос Грунт: проект космической экспедиции. В 2 т. Т.1 / авт.-сост. В.В. Ефанов, А.В. Захаров. М.: ООО «Полстар», 2011. 237 с.
4. Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов: учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2007. 54 с.
5. Старовойтов Е.И. Способ обнаружения пассивного космического объекта при сближении с ним активного космического аппарата: пат. № 2474844 РФ . 2011.
6. Старовойтов Е.И., Афонин В.В. Способ обнаружения пассивного космического объекта при сближении с ним активного космического аппарата: пат. № 2494415 РФ. 2013.
7. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Минск: Дизайн ПРО, 1998. 336 с.
8. Старовойтов Е.И., Савчук Д.В., Зубов Н.Е. Выбор лазеров для увеличения дальности бортовых локационных систем космических аппаратов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. 2013. №. 8. DOI: [10.7463/0813.0609292](https://doi.org/10.7463/0813.0609292)
9. Грибковский В.П. Полупроводниковые лазеры. Минск: Изд-во Университетское, 1988. 304 с.
10. Коцавец Н., Бученков В., Искандаров М., Никитичев А., Соколов Э., Тер-Мартirosян А. Мощные п/п источники излучения для накачки лазеров // Фотоника. 2008. № 3. С.12-13.
11. ОАО «Научно-производственное предприятие «Инжект». Продукция. Наборные решетки лазерных диодов квазинепрерывного режима работы. Режим доступа: <http://www.inject-laser.ru/products/oscillators/subpage1.ivp> (дата обращения 16.08.2013).
12. ЗАО «Полупроводниковые приборы». Часто задаваемые вопросы. Режим доступа: <http://www.atcsd.ru/faq/#3> (дата обращения 30.08.2013).
13. НТО «ИРЭ-Полус». Импульсные итербиевые лазеры. Режим доступа: http://www.ntoire-polus.ru/products_low_ili.html (дата обращения 22.08.2013).
14. Michel K., Ullrich A. Scanning time-of-flight laser sensor for rendezvous manoeuvres // Proc. of the 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation “ASTRA 2004”. ESTEC. The Netherlands, Noordwijk, 2-4 November 2004. Режим доступа: http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2004/Papers/astra2004_S-02.pdf (дата обращения 01.01.2014).
15. ОАО «Машиноаппарат». Проектирование и производство электродвигателей специального назначения. Условия эксплуатации и требования к надежности. Режим доступа: <http://mashap.maverick.ru/russian/spravka.htm> (дата обращения 22.08.2013).

16. Энциклопедия XXI век. Оружие и технологии России. Т. 11. Оптико-электронные системы и лазерная техника / под общ. ред. С.Б. Иванова. М.: ИД «Оружие и технологии», 2005. 740 с.
17. Парвулюсов Ю.Б., Родионов С.А., Солдатов В.П., Шехонин А.А., Якушенков Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов. 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Логос. 2000. 488 с.

Reliability analysis of onboard laser ranging systems for control systems by movement of spacecraft

02, February 2014

DOI: 10.7463/0214.0699720

E.I. Starovoitov

Russia, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation "Energia"

evgstarovojtov@yandex.ru

The purpose of this paper is to study and find the ways to improve the reliability of onboard laser ranging system (LRS) used to control the spacecraft rendezvous and descent. The onboard LRS can be implemented with optical-mechanical scanner and without it. The paper analyses the key factors, which influence on the reliability of both LRS. Reliability of LRS is pretty much defined by the reliability of the laser source and its radiation mode. Solid-state diode-pumped lasers are primarily used as a radiation source. The radiation mode, which is defined by requirements for measurement errors of range and speed affect their reliability. The basic assumption is that the resource of solid state lasers is determined by the number pulses of pumping diodes. The paper investigates the influence of radiation mode of solid-state laser on the reliability function when measuring a passive spacecraft rendezvous dosing velocity using a differential method. With the measurement error, respectively, 10 m for range and 0.6 m/s for velocity a reliability function of 0.99 has been achieved. Reducing the measurement error of velocity to 0.5 m/s either results in reduced reliability function < 0.99 or it is necessary to reduce the initial error of measurement range up to 3.5...5 m to correspond to the reliability function ≥ 0.995 . For the optomechanical scanner-based LRS the maximum pulse repetition frequency versus the range has been obtained. This dependence has been used as a basis to define the reliability function. The paper investigates the influence of moving parts on the reliability of scanning LRS with sealed or unsealed optomechanical unit. As a result, it has been found that the exception of moving parts is justified provided that manufacturing the sealed optomechanical LRS unit is impossible. In this case, the reliability function increases from 0.99 to 0.9999. When sealing the opto-mechanical unit, the same increase in reliability is achieved through duplication of electric motors. Apart from the other publications in the field concerned, this paper discloses the reliability problems of onboard LRS of different types. The results obtained can be used in development of onboard LRS for the long range spacecrafts including those of aimed at missions beyond the Earth orbital operation.

References

1. Pereira do Carmo J., Moebius B., Pfennigbauer M. Imaging LIDARs for Space Applications. *Proc. of SPIE*, 2008, vol. 7061, art no. 70610J-1. DOI: [10.1117/12.793701](#)
2. Christian J.A., Hinkel H., D'Souza C.N., Mauire S., Patangan M. *The Sensor Test for Orion RelNav Risk Mitigation (STORM) Development Test Objective*. Available at: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110013437_2011014090.pdf , accessed 01.01.2014.
3. Efanov V.V., Zakharov A.V., authors-compilers. *Fobos Grunt: proekt kosmicheskoy ekspeditsii. V 2 t. T. 1* [Phobos Grunt: project of space expedition. In 2 vols. Vol.1]. Moscow, OOO "Polstar" Publ., 2011. 237 p.
4. Malenkov M.I., Karatushin S.I., Tarasov V.M. *Konstruktsionnye i smazochnye materialy kosmicheskikh mekhanizmov* [Structural materials and lubricants of space mechanisms]. St. Petersburg, BSTU Publ., 2007. 54 p.
5. Starovoytov E.I. *Sposob obnaruzheniya passivnogo kosmicheskogo ob"ekta pri sblizhenii s nim aktivnogo kosmicheskogo apparata* [Method for detecting a passive space object when approaching with him active spacecraft]. Patent RF, no. 2474844. 2011.
6. Starovoytov E.I., Afonin V.V. *Sposob obnaruzheniya passivnogo kosmicheskogo ob"ekta pri sblizhenii s nim aktivnogo kosmicheskogo apparata* [Method for detecting a passive space object when approaching with him active spacecraft]. Patent RF, no. 2494415. 2013.
7. Borovikov S.M. *Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya, tekhnologii i nadezhnosti* [Theoretical foundations of design, technology and reliability]. Minsk, Dizayn PRO Publ., 1998. 336 p.
8. Starovoitov E.I., Savchuk D.V., Zubov N.E. [Selection of lasers for increasing the range of onboard laser ranging systems of space vehicles]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman - Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 8. DOI: [10.7463/0813.0609292](#)
9. Gribkovskiy V.P. *Poluprovodnikovye lazery* [Semiconductor lasers]. Minsk, Universitetskoe Publ., 1988. 304 p.
10. Kotsavets N., Buchenkov V., Iskandarov M., Nikitichev A., Sokolov E., Ter-Martirosyan A. [High-power semiconductor sources for pumping lasers]. *Fotonika - Photonika*, 2008, no. 3, pp.12-13.
11. OAO "Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie "Inzhekt". Produktsiya. Nabornye reshetki lazernykh diodov kvazinepreryvnogo rezhima raboty [JSC "Scientific-production enterprise "Inject". Products. Composing lattice of laser diodes with quasicontinuous mode of operation]. Available at: <http://www.inject-laser.ru/products/oscillators/subpage1.jsp> , accessed 16.08.2013.
12. ZAO "Poluprovodnikovye pribory" [CJSC "Semiconductor devices"]. Website. Available at: <http://www.atcsd.ru/faq/#3> , accessed 30.08.2013.

13. NTO “IRE-Polus”. Impul'snye itterbievye lazery [Scientific and Engineering Society “IRE-Polus”. Pulsed fiber laser]. Available at: http://www.ntoire-polus.ru/products_low_ili.html , accessed 22.08.2013.
14. Michel K., Ullrich A. Scanning time-of-flight laser sensor for rendezvous manoeuvres. In: *Proc. of the 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation “ASTRA 2004”*. ESTEC, The Netherlands, Noordwijk, 2-4 November 2004. Available at: http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2004/Papers/astra2004_S-02.pdf , accessed 01.01.2014.
15. OAO “Mashinoapparat”. Proektirovanie i proizvodstvo elektrodvigately spetsial'nogo naznacheniya. Usloviya ekspluatatsii i trebovaniya k nadezhnosti [JSC “Mashinoapparat”. Design and manufacture of special purpose electric motors. Operating conditions and reliability requirements]. Available at: <http://mashap.maverick.ru/russian/spravka.htm> , accessed 22.08.2013.
16. Ivanov S.B., ed. *Entsiklopediya 21 vek. Oruzhie i tekhnologii Rossii. T. 11. Optiko-elektronnyye sistemy i lazernaya tekhnika* [The 21 Century Encyclopedia. Russian's Arms and Technologies. Vol. 11. Optoelectronic systems and laser equipment]. Moscow, Publishing House “Weapon and technologies”, 2005. 740 p.
17. Parvulyusov Yu.B., Rodionov S.A., Soldatov V.P., Shekhonin A.A., Yakushenkov Yu.G. *Proektirovanie optiko-elektronnykh priborov* [Design of optoelectronic devices]. Moscow, Logos, 2000. 488 p.