

Выбор лазеров для увеличения дальности бортовых локационных систем космических аппаратов

08, август 2013

DOI: 10.7463/0813.0609292

Старовойтов Е. И., Савчук Д. В., Zubov Н. Е.

УДК: 629.7.05

Россия, Москва, ОАО «Ракетно-космическая Корпорация «Энергия» им. С.П. Королева»

evgstarovojtov@yandex.ru

post@rsce.ru

Введение

В настоящее время для управления сближением и стыковкой пилотируемых и автоматических космических аппаратов (КА) все шире применяются лазерные локационные системы (ЛЛС).

На сегодняшний день бортовые ЛЛС уступают по дальности радиотехническим системам [1, 2] в результате чего повышаются требования к точностям предварительного выведения кооперируемых КА. При этом бортовые ЛЛС имеют более высокие точности измерений дальности, меньшие массогабаритные характеристики и энергопотребление (см. табл. 1), что является значительным преимуществом при выполнении полетов к другим планетам.

В состав радиотехнических систем входит радиоответчик на пассивном КА. В то же время ЛЛС может работать без ответных устройств, по диффузно отраженному от корпуса пассивного КА сигналу. Если требуется увеличить дальность или повысить точность измерений, то используются уголкового отражатели (УО), не требующие энергопитания и управления. Основным показателем, по которому ЛЛС проигрывают радиотехническим системам, является дальность, что затрудняет применение ЛЛС в условиях отсутствия предварительного целеуказания, особенно вне околоземной орбиты. Таким образом, увеличение дальности ЛЛС на несколько порядков является актуальной задачей

Таблица 1

Сравнительные характеристики бортовых радиотехнических систем и ЛЛС для управления сближением и стыковкой КА

ЛЛС	КА-носитель	Рабочий диапазон	Дальность, км	Масса, кг	Потребляемая мощность, Вт	Ответная часть на пассивном КА
[1]	Лунный модуль, «Аполлон»	Радиотехнический	740	33	160	Радиоответчик, масса 7 кг, потреб. мощн. 75 Вт
Курс [2]	«Союз», «Прогресс», МКС	Радиотехнический	400	93	240	Радиоответчик, масса 85 кг, потреб. мощн. 170 Вт
RVS (TGM) [3]	ATV	Оптический	0,73	14	61	Блоки УО, Масса не более 2 кг
RLS [4]	XSS-1	Оптический	3	10	75	Не требуется

Большая часть характеристик ЛЛС, в том числе максимальная дальность, определяется техническими параметрами используемых лазеров.

Цель работы состоит в анализе возможностей и выборе лазерных источников, применение которых позволяет увеличить дальность ЛЛС до 10 км по диффузно отраженному сигналу и до 400 км при использовании УО.

В доступных литературных источниках этот вопрос полностью не раскрыт. В работе [3] рассмотрена замена полупроводникового лазерного диода (ЛД) в бортовой ЛЛС на волоконный лазер (ВЛ) и представлены результаты моделирования, показывающие влияние параметров ВЛ на дальность ЛЛС.

Научная новизна работы заключается в том, что выполнен анализ характеристик лазеров разных типов применительно к задаче увеличения дальности ЛЛС по диффузно отраженному сигналу и по УО в импульсном и непрерывном режиме излучения, что позволяет обосновать выбор для применения в ЛЛС лазера того или иного типа.

Полученные в работе результаты могут использоваться при разработке бортовых ЛЛС для перспективных КА, предназначенных для полетов на околоземной орбите и за ее пределами.

1 Анализ характеристик лазеров разных типов

Бортовые ЛЛС для управления сближением и стыковкой КА [3,5-7] работают в ближнем ИК-диапазоне, для которого промышленность серийно выпускает источники и фотоприемные устройства (ФПУ).

В настоящее время на рынке предлагается широкая номенклатура ЛД на AlGaAs и InGaAsP, излучающих в импульсном и непрерывном режиме, которые могут быть использованы в ЛЛС.

Преимущества полупроводниковых ЛД заключаются в большом КПД (до 50 %), малой массе и габаритах. Однако ограниченная выходная энергия импульса и большая расходимость излучения обеспечивают дальность всего до 730 м [3].

Все бортовые ЛЛС использующие ЛД для подсветки [3,5-7] работают по УО, что обусловлено низкой энергией импульсов.

Если используется набор из нескольких ЛД, то возникают проблемы, связанные с точной синхронизацией зондирующего импульса и формированием единой диаграммы излучения, что не позволяет их использовать для локации удаленного точечного объекта.

Поэтому в системах [5-7], где для подсветки применяется несколько ЛД, используется угломерный метод измерения дальности с применением матричных ФПУ. Недостатком является то, что широкое поле зрения ЛЛС увеличивает чувствительность к помехам и требуется введение ограничений по внешней светотехнической обстановке.

С использованием наборной решетки ЛД реализована ЛЛС для контроля скорости автотранспортных средств в диапазоне дальностей 5...400 м [8]. Недостатком данной системы применительно к задаче управления сближением КА является довольно значительная погрешность измерения дальности (см. табл. 2).

Таблица 2

Характеристики ЛЛС, использующих полупроводниковые ЛД

ЛЛС	Длина волны, мкм	Расходимость пучка	Дальность	Погрешность измерения дальности, м	Ответные устройства	Поле зрения
VDM [5]	0,81	–	300 м	0,01...5,8	УО	24°×24°
RVS (TGM) [3]	–	–	730 м	0,01...0,5	УО	40°×40°
VGS [6]	0,78 0,83	30°×30°	150 м	0,03	УО	16°×21°
AVGS [7]	0,80 0,85	7°	300 м	0,012...0,015	УО	16°×16°
ЛИСД-2М [8]	0,80	0,23°×0,23°	400 м	0,2	–	0,23°×0,23°

В данном случае при работе по диффузно отраженному сигналу из-за широкой диаграммы излучения ЛД пятно подсветки сильно размазывается по корпусу объекта, в результате чего возрастает погрешность.

Применение импульсных ЛД в ближней высокоточной дальнометрии требует дальнейшей проработки.

ТТЛ, широко используемые в ЛЛС различного назначения, позволяют получить импульсы с большой энергией и малой расходимостью. На практике в основном используются неодимовые ТТЛ на иттрий-алюминиевом гранате (Nd:YAG), излучающие на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм и ТТЛ на эрбиевом стекле с длиной волны излучения $\lambda = 1,54$ мкм (более безопасной для органов зрения).

Неодимовые ТТЛ обладают более высокой энергетической эффективностью по сравнению с эрбиевыми ТТЛ за счет четырехуровневой схемы работы.

Специфика эрбиевых ТТЛ заключается в трехуровневой схеме работы. Их недостатком является низкий КПД. Кроме того, низкий коэффициент теплопроводности активной среды ограничивает частоту повторения импульсов излучения.

По этой причине получают распространение модели неодимовых ТТЛ с преобразованием длины волны $\lambda = 1,06$ мкм в $\lambda = 1,57$ мкм, удовлетворяющие требованиям лазерной безопасности.

ТТЛ с ламповой накачкой, несмотря на то, что позволяют получить импульсы излучения большой мощности, имеют КПД ниже на порядок по сравнению с ТТЛ с полупроводниковой накачкой ЛД (ППН). Излучение ЛД малоинерционно, легко модулируется током накачки, что позволяет через управление накачкой воздействовать на параметры излучения лазера.

Однако для получения импульсов с высокой энергией требуется использование большого числа ЛД накачки, что приводит к усложнению конструкции лазерного источника. Кроме того, необходима компенсация температурного сдвига длины волны излучения ЛД, что ужесточает требования к обеспечению теплового режима лазера.

В настоящее время имеются модели ТТЛ ППН с энергией импульса 200 мДж. Если в передающем оптическом тракте потери составляют $\tau_{пер} = 0,5$, то энергия зондирующего пучка будет ограничена 100 мДж.

По этим причинам ТТЛ с ламповой накачкой, несмотря на свои недостатки, пока еще находят свое применение в ряде ЛЛС.

ТТЛ по сравнению с ЛД присущи следующие недостатки: относительно низкий КПД, большие масса и габариты, сложная конструкция. Кроме того, для использования

ТТЛ на борту КА необходимо обеспечить устойчивость его резонатора к разъюстировке под воздействием вибраций и ускорений.

К разъюстировке резонатора устойчивы ВЛ. На рынке имеются предложения моделей ВЛ для использования в ЛЛС [9]. В настоящее время недостатком ВЛ является ограниченная энергия импульса (менее 1 мДж). Разработчиками RVS (TGM) рассматривалась замена имеющего ограниченные возможности ЛД на иттербиевый ВЛ с длиной волны 1,06 мкм для работы по диффузно отражающим поверхностям и увеличения дальности до 6 км [3].

ВЛ впервые прошел летные испытания в составе межбортовой системы лазерной связи КА, где обеспечивалась дальность передачи информации 55 000 км [10].

Энергия импульсов разных типов лазеров представлены в табл. 3.

Таблица 3

Энергия и мощность импульсов для разных типов лазеров

Тип	Лазер	Разработчик	Активный элемент	Длина волны, мкм	Энергия импульса
Решетка ЛД	ИЛПИ-137А	ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»	AlGaAs/ GaAs	0,86	50 мкДж
ТТЛ ППН	IFL-N(150)20030-ЕО	Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси	Nd:YAG	1,06	150/200 мДж
	IFL-N5030-ОРО			1,57	50 мДж
	—	ОАО «НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова»	Nd:YAG	1,06	100 мДж
				1,57	30 мДж
	МИ-10	ОАО «ЛОМО»	Er:стекло	1,54	10...18 мДж
ВЛ	VPFL-SP-10000	V-Gen Electro Optics Ltd.	—	1,06	200 мкДж

2 Энергетическая оценка дальности ЛЛС

Требования к лазерному источнику существенно различаются в зависимости от свойств объекта локации и принципов работы ЛЛС.

Если пассивный КА является диффузно отражающим, то характеристики обнаружения определяются в большей степени его площадью. Можно выделить основные типы пассивных КА: транспортные КА и модули орбитальных станций, имеющие площадь около 10 м^2 и большие орбитальные комплексы типа МКС со сложной конфигурацией, суммарная площадь которых составляет более 100 м^2 . Для упрощения, корпуса пассивных КА аппроксимируем ламбертовской поверхностью, в качестве среднего значения альбедо принимаем 0,5.

Отдельно следует выделить КА, снабженные отдельными одиночными УО и конгломератами разнонаправленных УО.

Определить влияние лазерного источника на дальность ЛЛС можно посредством светотехнических расчетов в приближении геометрической оптики, через так называемое «классическое» уравнение лазерной локации [11], изменяющее свою форму в зависимости от дальности до объекта и наличия на нем УО.

Если границы объекта не перекрываются зондирующим пучком, то дальность определяется соотношением

$$D = \sqrt{\frac{P_{\text{л}} \cdot d_{\text{пр}}^2 \cdot \rho_{\text{об}} \cdot \tau_{\text{пер}} \cdot \tau_{\text{пр}}}{4 \cdot P_{\text{мин}}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{л}}$ – мощность излучения лазерного источника; $d_{\text{пр}}$ – диаметр приемного объектива; $\rho_{\text{об}}$ – коэффициент отражения поверхности объекта; $P_{\text{мин}}$ – минимальная регистрируемая ФПУ мощность принятого сигнала; $\tau_{\text{пр}}$ – коэффициент пропускания приемного оптического тракта.

В ЛЛС применяются два метода измерения дальности: времяпролетный и фазовый, которые определяют режим излучения – импульсный и непрерывный.

Точность импульсного метода измерений в большинстве систем составляет 5-10 м [12], однако, применение ряда решений позволяет повысить точность измерений до 0,1-0,3 м [12, 13]. Для улучшения точности в ближнем канале бортовой ЛЛС может использоваться фазовый метод измерений [14].

Оценка дальности фазового канала позволяет понять возможности использования непрерывных лазерных источников в ЛЛС. Мощность непрерывного лазера ограничена лимитами энергопотребления на борту КА, кроме того, согласно требованиям ГОСТ Р 50723-94, безопасность для органов зрения обеспечивается если мощность непрерывного лазерного излучения не превышает 1 мВт.

Для приема сигнала в ЛЛС часто применяются ФПУ на основе полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД), имеющих высокую чувствительность и устойчивость к сильным помехам.

Минимально регистрируемая ФПУ мощность определяется соотношением [11]

$$P_{\text{мин}} = q \cdot P_{\text{шз}}, \quad (2)$$

где: q – отношение сигнал/шум; $P_{\text{шз}}$ – эквивалентная мощность шума.

В первом приближении эквивалентную мощность шума можно определить формулой

$$P_{шз} = \frac{i_T}{S_\lambda}, \quad (3)$$

где i_T – темновой ток ЛФД, А; S_λ – токовая чувствительность ЛФД.

Для ЛФД с характеристиками $i_T = 40$ нА и $S_\lambda = 10$ А/Вт

$$P_{шз} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Вт.}$$

Оценим работу фазового канала, в котором используется ЛД, излучающий в непрерывном режиме с мощностью 1 мВт. Диаметр приемной апертуры равен $d_{np} = 2$ см.

Особенностью работы фазового канала ЛЛС на ближнем участке (во время причаливания) является то, что пассивный КА занимает все поле зрения, независимо от его линейных размеров и находится в тени активного КА, в результате чего влиянием световых помех можно пренебречь.

Пренебрегая потерями в оптическом тракте ($\tau_{пер} = \tau_{пр} = 1$), ввиду его простоты для ближнего канала, получаем следующие цифры. Для получения достоверного измерения дальности отношение сигнал/шум на практике выбирается не менее $q = 3$ [13], а обычно оно принимается $q = 7 \dots 10$ [11].

Для значения $q = 10$ максимальная дальность составит 1,11 м. При минимальной величине $q = 3$ дальность будет равна 2,04 м. Таким образом, дальность непрерывного канала ограничена несколькими метрами.

Если на объекте установлен УО с площадью $S_{УО}$, коэффициентом отражения $\rho_{УО}$ и телесным углом распространения отраженного пучка $\Omega_{отр}$, то дальность ЛЛС будет определяться выражением

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_\lambda \cdot S_{УО} \cdot S_{пр} \cdot \rho_{УО} \cdot \tau_{пер} \cdot \tau_{пр}}{P_{\min} \cdot \Omega_{пер} \cdot \Omega_{отр}}}, \quad (4)$$

где $S_{пр}$ – площадь приемной апертуры; $\Omega_{пер}$ – телесный угол распространения зондирующего пучка.

Соответственно, зависимость энергии импульса пропорциональна уже не второй, а четвертой степени дальности, однако это компенсируется узкой диаграммой отражения УО, позволяющей увеличить дальность на несколько порядков.

При использовании одиночного УО с диаметром $d_{пр} = 28,2$ мм, точностью изготовления $\alpha_{УО} = 10''$ и эффективностью $\rho_{УО} = 0,95$ дальность фазового дальномера ($q = 10$ и $\gamma = 0,2$ мрад) составит 2,12 км.

При реализации фазового канала необходимо учитывать его слабую помехозащищенность. В отличие от импульсного канала, помехи от фоновой засветки и диффузно рассеянного излучения Солнца от корпуса пассивного КА могут нарушить работу фазового дальномера. Поэтому на больших дальностях использование фазового метода представляется нецелесообразным, а увеличение дальности ЛЛС возможно только в импульсном режиме.

С увеличением дистанции между КА диаметр пятна подсветки становится больше и возрастает погрешность, обусловленная протяженностью конструкции пассивного КА вдоль направления распространения импульса (если не используется УО). Поэтому, существующей точности времяпролетного метода достаточно для управления сближением.

Для импульсного режима оценка выполняется аналогично, путем замены мощности в выражении (3) на энергию. Пороговая энергия определяется выражением

$$E_{\min} = q \cdot P_{\text{шз}} \cdot t_u, \quad (5)$$

где t_u – длительность регистрируемого импульса.

При $t_u = 20$ нс

$$E_{\min} = 8 \cdot 10^{-17} \text{ Дж.}$$

Если расходимость зондирующего пучка составляет $\gamma = 1$ мрад, то объект с линейными размерами 10 м полностью покроется пучком подсветки на дальности 10 км. На большом удалении пассивный КА представляет собой точечный объект, дальность до которого составляет

$$D = \sqrt[4]{\frac{E_{\text{л}} \cdot S_{\text{об}} \cdot d_{\text{нр}}^2 \cdot \rho_{\text{об}} \cdot \tau_{\text{нр}} \cdot \tau_{\text{нр}}}{\pi \cdot \gamma^2 \cdot E_{\min}}}, \quad (6)$$

где $S_{\text{об}}$ – рассеивающая площадь объекта; γ – плоский угол расходимости зондирующего пучка.

Так как зависимость энергии подсветки пропорциональна четвертой степени дальности, а рассеяние отраженного сигнала происходит в полном телесном угле, то для увеличения дальности ЛЛС целесообразно увеличить приемную апертуру до $d_{\text{нр}} = 10$ см. Также с усложнением конструкции приемного и передающего оптических трактов возрастают потери. Примем величину потерь равной $\tau_{\text{нр}} = \tau_{\text{нр}} = 0,5$.

Дополнительного увеличения дальности обнаружения можно достигнуть за счет снижения отношения сигнал/шум, однако это не всегда оправдано по причине снижения

помехоустойчивости системы. Тем не менее, могут быть использованы алгоритмы обработки принятого сигнала, помехи могут быть устранены, а дальность обнаружения пассивного КА увеличена.

На рис. 1 представлена зависимость дальности ЛЛС по диффузно отражающему объекту с $S_{об} = 10 \text{ м}^2$ от отношения сигнал/шум на входе приемника (при $E_z = 2 \text{ мДж}$, $\gamma = 1,0 \text{ мрад}$, $d_{np} = 10 \text{ см}$).

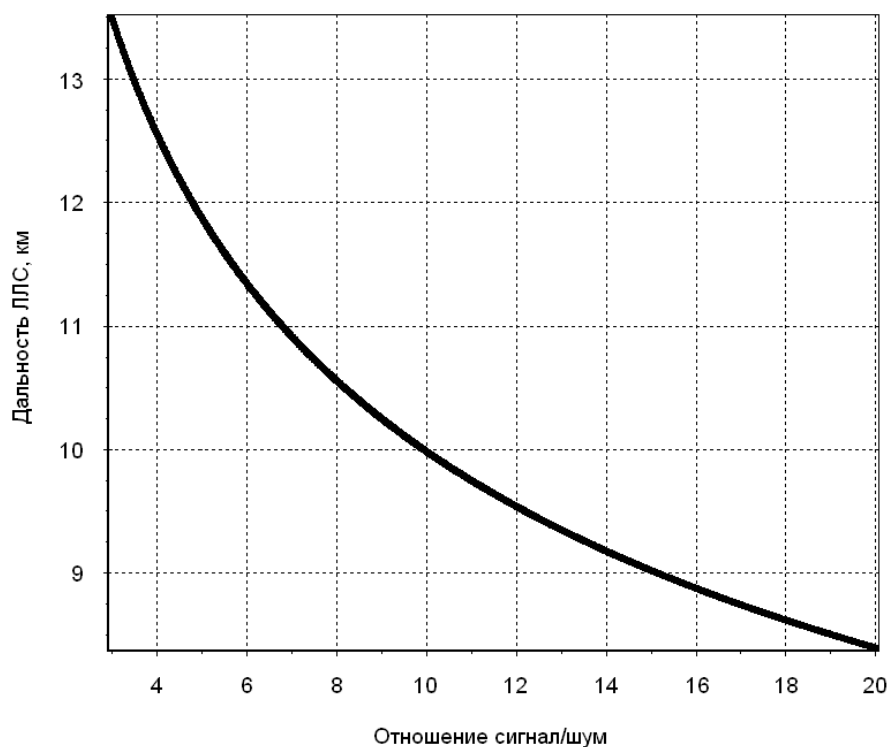


Рис. 1. Зависимость дальности ЛЛС по диффузно отражающему объекту от отношения сигнал/шум на входе приемника

С увеличением дистанции уменьшается видимый угловой размер пассивного КА. Возникает задача удержания объекта в створе зондирующего пучка при данных точностях поддержания ориентации активного КА. Чтобы наведение зондирующего пучка и сопровождение по угловым координатам пассивного КА не представляли сложностей, предпочтительно использовать относительно широкие пучки излучения (до $\gamma = 6,0 \text{ мрад}$).

Результаты расчетов дальности для импульсов ВЛ и ТТЛ по формулам (1) и (6) при разных исходных данных (d_{np} , q , γ) представлены в табл. 4.

Дальности ЛЛС, использующих ВЛ и ТТЛ при разных исходных данных

Тип лазера	E_z , мДж	$S_{об}$, м ²	q	γ , мрад	D , км
ВЛ	0,2	10	10	1,0	5,62
		10	3	1,0	7,59
		10	3	6,0	3,10
		100	10	1,0	8,84
		100	10	6,0	4,08
		100	3	6,0	5,51
ТТЛ	2	10	10	1,0	9,99
		10	10	6,0	4,08
		10	3	6,0	5,51
		100	10	1,0	17,76
		100	10	6,0	7,25
		100	3	6,0	9,80

3 Особенности применения ТТЛ в бортовых ЛЛС

При использовании ТТЛ возникает вопрос, связанный с обеспечением их теплового режима в зависимости от способа накачки и длины волны. Если ЛЛС излучает зондирующие импульсы излучения с частотой $f = 10$ Гц, то средняя мощность лазерного излучения будет равна

$$P_u = E_z \cdot f, \quad (7)$$

$$P_u = 0,02 \text{ Вт.}$$

Для неодимового ТТЛ с диодной накачкой КПД составляет $\eta = 0,2 \dots 0,3$. Принимая $\eta = 0,25$, получаем тепловой поток от лазера

$$P_{л1} = \frac{1-\eta}{\eta} \cdot P_u, \quad (8)$$

$$P_{л1} = 0,06 \text{ Вт.}$$

При использовании параметрического преобразования излучения с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм в излучение с длиной волны $\lambda = 1,57$ мкм эффективность составляет 0,5. Тогда тепловой поток увеличивается до

$$P_{л2} = 0,12 \text{ Вт.}$$

Эффективность эрбиевого лазера с длиной волны $\lambda = 1,54$ мкм ниже на порядок из-за трехуровневой схемы работы. При $\eta = 0,01$ тепловой поток составит

$$P_{л3} = 1,98 \text{ Вт.}$$

Сложности использования спектрального диапазона 1,54...1,57 мкм при работе на большие дальности обусловлены ограниченной энергией импульсов и низким КПД.

Для увеличения дальности ЛЛС приходится сужать диаграмму направленности зондирующего пучка. Однако, применение узких пучков, с шириной как в системах лазерной связи (менее $50'' = 0,24$ мрад) требует дополнительной высокоточной подсистемы, обеспечивающей наведение и сопровождение пассивного КА.

Точность наведения зондирующего пучка ограничивается точностью поддержания ориентации КА-носителя ЛЛС. С этой точки зрения предпочтительно использовать широкие зондирующие пучки.

Расширение диаграммы зондирующего пучка компенсируется использованием УО с минимальной погрешностью изготовления двухгранных углов (более высокого качества), что позволяет снизить требования к точности наведения ЛЛС без потери дальности, за счет сосредоточения слабого отраженного сигнала в узком телесном угле [15].

Диаметр УО, как правило, не превышает 100 мм, так как при дальнейшем увеличении размеров представляет проблему изготовление с требуемой точностью двухгранных углов.

Если пассивный КА ориентирован произвольным образом, то на нем с разных сторон размещаются конгломераты из нескольких разнонаправленных УО. В результате, при подходе активного КА с произвольного направления, засвечивается хотя бы один УО в пределах его рабочего диапазона углов. Однако подсветка под углом, отличающимся от нормали, приводит к снижению эффективности УО, поэтому для дальнейшей оценки принимаем $\rho_{УО} = 0,85$.

На рис. 2 представлена зависимость дальности ЛЛС от угла $\alpha_{УО}$ (при $E_z = 2$ мДж, $\gamma = 6,0$ мрад, $d_{np} = 10$ см, $q = 10$, $S_{УО} = 78,54$ см²).

Угловая расходимость отраженного от УО пучка теоретически определяется его дифракционными свойствами [16]. Угловая ширина центрального максимума дифракционной картины Эйри в сечении отраженного пучка равна

$$2\alpha_{диф} = \frac{2,44 \cdot \lambda}{d_{УО}}, \quad (9)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения; $d_{УО}$ – диаметр окружности, вписанной во входную грань УО.

При $d_{УО} = 100$ мм для длины волны $\lambda = 1,06$ мкм дифракционная расходимость отраженного пучка равна $\alpha_{диф} = 2,67''$, а для длины волны $\lambda = 1,57$ мкм она составляет $\alpha_{диф} = 3,95''$.

В совокупности со снижением энергии импульса (минимум в два раза) это снижает дальность ЛЛС.

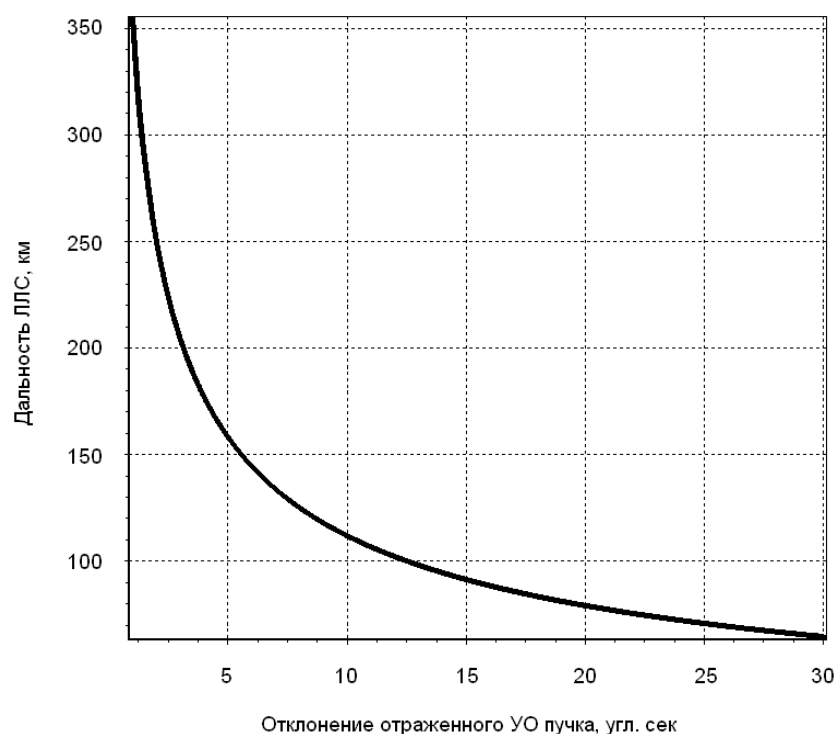


Рис. 2. Зависимость дальности ЛЛС от $\alpha_{УО}$

Одним из путей преодоления сложностей является использование двухчастотного лазера. Так, предложен неодимовый ТТЛ для ЛЛС, обеспечивающий генерацию на $\lambda = 1,06$ мкм и $\lambda = 1,57$ мкм с эффективностью преобразования не менее 40 % [17].

В табл. 5 представлены расчеты дальности для ЛЛС по формуле (4), использующей подобный двухволновый ТТЛ (при $\gamma = 1$ мрад, $q = 10$, $d_{np} = 10$ см) при работе по УО разного диаметра и, соответственно, с отличающейся дифракционной расходимостью.

Таблица 5

Дальность двухволновой ЛЛС по УО разного диаметра

Параметры зондирующего импульса	$d_{УО}$, мм	$\alpha_{диф}$, "	D , км
5 мДж, $\lambda = 1,06$ мкм	28,2	9,46	188,18
	50,8	5,25	339,13
	100,0	2,67	667,19
2 мДж, $\lambda = 1,57$ мкм	28,2	14,01	122,98
	50,8	7,78	221,55
	100,0	3,95	436,24

Как видно из табличных данных, при увеличении диаметра УО до 100 мм на обеих длинах волн обеспечивается дальность более 400 км.

Таким образом, для обеспечения дальности ЛЛС около 400 км на пассивном КА необходимо установить конгломераты разнонаправленных УО с диаметром 100 мм для обеспечения подхода активного КА в широком диапазоне углов.

Заключение

В работе исследованы возможности увеличения дальности бортовых ЛЛС для управления сближением и стыковкой КА за счет применения лазеров различных типов. С использованием методов геометрической оптики проведены энергетические расчеты дальности. Выполнены оценки теплового режима в зависимости от КПД используемого лазера и влияния дифракционной расходимости зондирующего пучка на дальность ЛЛС.

Были получены следующие результаты.

1) Полупроводниковые ЛД могут применяться при работе по объектам с УО на дистанциях до 1 км а также в непрерывном фазовом канале, обеспечивающем точные измерения в пределах нескольких метров на конечном участке причаливания. Применение импульсных ЛД для ближней высокоточной дальнометрии требует проработки.

2) ВЛ обеспечивают дальности до 10 км по диффузно отраженному сигналу, в зависимости от площади объекта, их применение пока ограничено низкой энергией импульсов.

3) Измерение дальностей свыше 10 км обеспечивается с использованием ТТЛ. Энергия импульса ТТЛ ППН ограничена возможностями накачки с использованием ЛД, тогда как переход на ламповую накачку для получения импульсов ЛЛС более 100 мДж не оправдан высоким энергопотреблением и нарушением теплового режима.

4) Дальность ЛЛС более 400 км обеспечивается установкой на пассивном КА УО диаметром 100 мм.

5) Использование безопасной длины волны ТТЛ $\lambda = 1,54...1,57$ мкм ограничено снижением КПД лазера в 2...10 раз и большей дифракционной расходимостью, проявляющейся при работе по УО. Поэтому представляет интерес реализация бортовой ЛЛС на основе двухволнового неодимого ТТЛ ППН с длинами волн 1,06 мкм и 1,57 мкм.

Список литературы

1. Гончаревский В.С. Радиоуправление сближением космических аппаратов. М.: Советское радио, 1976. 240 с.

2. Энциклопедия XXI век. Оружие и технологии России. Т. 5. Космические средства вооружения / Под общ. ред. С.Б. Иванова. М.: ИД «Оружие и технологии», 2002. 704 с.
3. Michel K., Ullrich A. Scanning time-of-flight laser sensor for rendezvous manoeuvres. Режим доступа: http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2004/Papers/astra2004_S-02.pdf (дата обращения 14.01.12).
4. Liadsky J. Recent Advancements in Commercial LIDAR Mapping and Imaging Systems. Режим доступа: <http://www.nps.edu/Academics/Centers/RSC/documents/RecentAdvancements.pdf> (дата обращения 26.01.13).
5. Videometer. Режим доступа: http://www.sodern.com/sites/docs_wsw/RUB_54/VDM.pdf (дата обращения 14.01.12).
6. Polites M.E. An assessment of the Technology of automated rendezvous and Capture in Space. Marshall Space Flight Center, Alabama. Режим доступа: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/courses/aoe4065/NASADesignSPs/tp208528.pdf> (дата обращения 20.01.12).
7. Howard R.T., Heaton A.F., Pinson R.M., Carrington C.L., Lee J.E., Robertson B.A., Spenser S.H., Johnson J.E. The Advanced Video Guidance Sensor: Orbital Express and the Next Generation. Режим доступа: <http://read.pudn.com/downloads135/doc/fileformat/573936/measure.pdf> (дата обращения 20.01.12).
8. Абазадзе Ю.В., Лицарев Н.А., Почтарев В.Л., Пашков В.А., Хачиев А.Ю., Казаков А.А., Коваль Ю.П., Симаков В.А., Неуструева В.Н., Егорова Г.С., Залевский И.Д., Бородкин А.А., Сапожников С.М. Особенности построения лазерного измерителя скорости и дальности ЛИСД-2М // Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 3. С. 247-250.
9. LIDAR Ytterbium Pulsed Fiber Lasers. Режим доступа: <http://www.vgen.com/UploadFiles/PDF/Lidar%20Ytterbium.pdf> (дата обращения 10.07.13).
10. Дмитриев С.В., Сумерин В.В., Чубыкин А.А., Шаргородский В.Д. Межспутниковая лазерная навигационно-связная система. ОАО «НПК «Системы прецизионного приборостроения». Режим доступа: <http://www.ipa.nw.ru/conference/wpltn2012/docs/24/1120%20chubikin.pdf> (дата обращения 08.07.13).

11. Назаров В.Н., Балашов И.Ф. Энергетическая оценка импульсных лазерных дальномеров. СПбГУ ИТМО, 2002. 38 с. Режим доступа: http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=27 (дата обращения 19.01.12).
12. Вильнер В., Ларюшин А., Рудь Е. Методы повышения точности импульсных лазерных дальномеров // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 3. С. 118-123.
13. Ставров А.А., Поздняков М.Г. Импульсные лазерные дальномеры для оптико-локационных систем // Доклады БГУИР. 2003. Т. 1, № 2. С. 59-65.
14. Lehr C.G. Laser Tracking Systems // In: Laser Applications. Academic Press, 1974. Vol. 2. P. 13.
15. Старовойтов Е.И., Савчук Д.В. Исследование и оптимизация применения уголкового отражателя для локации космических объектов // Космическая техника и технологии. 2013. № 1. С. 38-43.
16. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М. Основы импульсной лазерной локации: учеб. пособие для вузов / под ред. В.Н. Рождествина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 571 с.
17. Бученков В.А., Любимов В.В., Новиков Г.Е., Родионов А.Ю., Устюгов В.И. Твердотельный моноимпульсный лазер и двухволновый лазерный генератор: пат. на изобретение № 2346367. 2006.

Selection of lasers for increasing the range of onboard laser ranging systems of space vehicles

08, August 2013

DOI: 10.7463/0813.0609292

Starovoitov E.I., Savchuk D.V., Zubov N.E.

Russia, S.P. KOROLEV ROCKET AND SPACE CORPORATION «ENERGIA»

evgstarovojtov@yandex.ru

post@rsce.ru

The purpose of this paper is to analyze possibilities and select laser sources for onboard laser ranging systems (LLS) of space vehicles designed to locate by a diffusely reflected signal and corner reflectors (CR). Characteristics of semiconductor, solid-state and fiber lasers were presented. Energy evaluation of range capability of onboard LLS in pulsed and continuous radiation modes using lasers of different types was conducted. It was shown that increase in range capability of onboard LLS by a diffusely reflected signal up to 10 km was provided with the use of fiber lasers, and for the range capability of more than 10 km usage of solid-state lasers was required. Influence of corner reflector parameters on the range capability of LLS was estimated. The obtained results could be used in development of onboard LSS for innovative space vehicles.

Publications with keywords: [laser](#), [analyses](#), [space vehicle](#), [laser ranging system](#), [distance](#)

Publications with words: [laser](#), [analyses](#), [space vehicle](#), [laser ranging system](#), [distance](#)

References

1. Goncharevskiy V.S. *Radioupravlenie sblizheniem kosmicheskikh apparatov* [Radio control of space vehicles]. Moscow, Sovetskoe radio, 1976. 240 p.
2. Ivanov S.B., ed. *Entsiklopediya 21 vek. Oruzhie i tekhnologii Rossii. T. 5. Kosmicheskie sredstva vooruzheniya* [The 21 Century Encyclopedia. Russian's Arms and Technologies. Vol. 5. Space Weapons]. Moscow, Publishing House "Weapon and technologies", 2002. 704 p.
3. Michel K., Ullrich A. *Scanning time-of-flight laser sensor for rendezvous manoeuvres*. Available at:
http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2004/Papers/astra2004_S-02.pdf , accessed 14.01.12.

4. Liadsky J. *Recent Advancements in Commercial LIDAR Mapping and Imaging Systems*. Available at: <http://www.nps.edu/Academics/Centers/RSC/documents/RecentAdvancements.pdf> , accessed 26.01.13.
5. *Videometer*. Available at: http://www.sodern.com/sites/docs_wsw/RUB_54/VDM.pdf , accessed 14.01.12.
6. Polites M.E. *An assessment of the Technology of automated rendezvous and Capture in Space*. Marshall Space Flight Center, Alabama. Available at: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/courses/aoe4065/NASADesignSPs/tp208528.pdf> , accessed 20.01.12.
7. Howard R.T., Heaton A.F., Pinson R.M., Carrington C.L., Lee J.E., Robertson B.A., Spenser S.H., Johnson J.E. *The Advanced Video Guidance Sensor: Orbital Express and the Next Generation*. Available at: <http://read.pudn.com/downloads135/doc/fileformat/573936/measure.pdf> , accessed 20.01.12.
8. Abazadze Yu.V., Litsarev N.A., Pochtarev V.L., Pashkov V.A., Khachiev A.Yu., Kazakov A.A., Koval' Yu.P., Simakov V.A., Neustrueva V.N., Egorova G.S., Zalevskiy I.D., Borodkin A.A., Sapozhnikov S.M. Osobennosti postroeniya lazernogo izmeritelya skorosti i dal'nosti LISD-2M [Constructional features of a LISD-2M laser velocimeter and rangefinder]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electron], 2002, vol. 32, no. 3, pp.247-250. DOI: [10.1070/QE2002v032n03ABEH002173](https://doi.org/10.1070/QE2002v032n03ABEH002173)
9. *LIDAR Ytterbium Pulsed Fiber Lasers*. Available at: <http://www.vgen.com/UploadFiles/PDF/Lidar%20Ytterbium.pdf> , accessed 10.07.13.
10. Dmitriev S.V., Sumerin V.V., Chubykin A.A., Shargorodskiy V.D. *Mezhsputnikovaya lazernaya navigatsionno-svyaznaya sistema* [Intersatellite laser navigating link system]. Open Joint-stock Company "Research-and-Production Corporation "Precision Systems and Instruments", Russia. Available at: <http://www.ipa.nw.ru/conference/wpltn2012/docs/24/1120%20chubikin.pdf> , accessed 08.07.13.
11. Nazarov V.N., Balashov I.F. *Energeticheskaya otsenka impul'snykh lazernykh dal'nomerov* [Energy assessment of pulsed laser rangefinders]. SPbNRU ITMO, 2002. 38 p. Available at: http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=27 , accessed 19.01.12.
12. Vil'ner V., Laryushin A., Rud' E. Metody povysheniya tochnosti impul'snykh lazernykh dal'nomerov [Methods for increasing impulse lasers range-finders accuracy]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [ELECTRONICS: Science, Technology, Business], 2008, no. 3, pp.118-123.
13. Stavrov A.A., Pozdnyakov M.G. Impul'snye lazernye dal'nomery dlya optiko-lokatsionnykh system [Pulsed laser rangefinders for optical location systems]. *Doklady BGUIR* [Reports of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)], 2003, vol.1, no. 2, pp. 59-65.

14. Lehr C.G. Laser Tracking Systems. In: *Laser Applications*. Academic Press, 1974, vol. 2, p. 13.
15. Starovoytov E.I., Savchuk D.V. Issledovanie i optimizatsiya primeneniya ugolkovykh otrazhateley dlya lokatsii kosmicheskikh ob"ektov [Research and optimization the use corner reflectors for laser location of space objects]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Engineering and Technology], 2013, no. 1, pp. 38-43.
16. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M. *Osnovy impul'snoi lazernoi lokatsii* [The basics of pulsed laser location]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 571 p.
17. Buchenkov V.A., Lyubimov V.V., Novikov G.E., Rodionov A.Yu., Ustyugov V.I. *Tverdotel'nyy monoimpul'snyy lazer i dvukhvovnovyy lazernyy generator* [Single-pulse solid-state laser and double-wavelength laser generator]. Patent for invention, no. 2346367, 2006.