

УДК 629.7.05

Программа «МИТРА» для моделирования характеристик бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов

Старовойтов Е.И., Савчук Д.В.

*Ракетно-космическая корпорация "Энергия",
ул. Ленина, 4а, Королёв, Московская обл., 141070, Россия*

e-mail: post@rsce.ru

Аннотация

Исследованы характеристики бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов методами математического моделирования. С использованием модели на основе приближений геометрической оптики разработана программа «МИТРА». Эта программа предназначена для оценки возможностей импульсных лазерных локационных систем при работе по близкорасположенным или удаленным космическим объектам, имеющим диффузно отражающую поверхность, а также снабженными уголковыми отражателями. Исследовано влияние расходимости зондирующего пучка и фоновой засветки на дальность локации. Результаты моделирования показывают, что программу «МИТРА» можно рекомендовать к широкому применению в проектных работах.

Ключевые слова: лазерная локационная система, космический аппарат, стыковка, моделирование, программа для ЭВМ.

Введение

Для выполнения операций сближения и стыковки перспективных космических аппаратов (КА) планируется использовать бортовые лазерные локационные системы (ЛЛС), которые должны заменить радиотехнические системы, обеспечивающие сближение и стыковку КА типа «Союз» и «Прогресс».

Разработка бортовых ЛЛС является сложным процессом, включающим в себя энергетический расчет, анализ фоновой обстановки, возникающей в космическом полете [1], оценку лазерной безопасности для органов зрения экипажа, решение оптимизационных задач [2] и т.д.

При выполнении энергетических расчетов для оценки максимальной дальности ЛЛС и подтверждения выполнения требований по назначению, заданных в ТЗ, необходимо учитывать влияние геометрических размеров объектов относительно зондирующего пучка, а также наличие оптических ответных устройств – уголковых отражателей (УО).

Как показывает практика, использование общепринятых методик расчета, описанных в специальной литературе [3,4,5], оказывается достаточно трудоемким и затратным. Становится актуальным анализ и выбор моделей, на основе которых возможна разработка специализированных программ для ЭВМ, облегчающих труд разработчика.

Цель работы состоит в исследовании характеристик бортовых ЛЛС при работе по различным космическим объектам методами математического моделирования.

Для построения модели использовалось «классическое» уравнение лазерной локации, построенное в приближениях геометрической оптики, и метод расчета

спектральной плотности излучения на основе закона Планка для абсолютно черного тела (АЧТ).

С использованием построенной модели разработана программа «МИТРА», предназначенная для оценки возможностей бортовых ЛЛС КА – дальномеров и лидаров, работающих в импульсном режиме, при работе по близкорасположенным или удаленным космическим объектам, имеющим диффузно отражающую поверхность, а также снабженными УО. Программа «МИТРА» написана на языке высокого уровня C++, код составлен из расчета на синтаксическую простоту и быстрдействие выполняемых функций, он включает функции с возвращающимися параметрами, вычисления производятся итерационным методом.

Методы моделирования

Для определения характеристик ЛЛС выполняются светотехнические расчеты, основанные на приближениях геометрической оптики, которые сводятся к «классическому» уравнению лазерной локации [3,4,5], изменяющему свою форму в зависимости от дальности до объекта и наличия на нем УО.

Дальность ЛЛС при работе по точечному (удаленному) диффузному объекту

$$D = \sqrt[4]{\frac{E_l \cdot S_{об} \cdot d_{np}^2 \cdot \rho_{об} \cdot \tau_{пер} \cdot \tau_{np}}{\pi \cdot \gamma^2 \cdot q \cdot E_{пор}}} ; \quad (1)$$

где: E_l – энергия излучения лазерного источника; $S_{об}$ – рассеивающая площадь объекта; γ – плоский угол расходимости зондирующего пучка; d_{np} – диаметр приемного объектива; q – отношение сигнал/шум; $\rho_{об}$ – коэффициент отражения поверхности объекта; $E_{пор}$ – пороговая регистрируемая ФПУ энергия принятого

сигнала; $\tau_{пер}$ – коэффициент пропускания передающего оптического тракта; $\tau_{пр}$ – коэффициент пропускания приемного оптического тракта.

Если диаметр зондирующего пучка равен или меньше площади объекта, то в таком случае

$$D = \sqrt{\frac{E_{л} \cdot d_{пр}^2 \cdot \rho_{об} \cdot \tau_{пер} \cdot \tau_{пр}}{4 \cdot q \cdot E_{нор}}} . \quad (2)$$

При определении формы уравнения для случая работы по диффузно отражающему объекту (см. выражения 1 и 2) предполагается, что энергия равномерно распределена внутри диаграммы зондирующего излучения и проекция объекта на плоскость поперечного сечения пучка подсветки имеет форму круга (симметрично покрывается зондирующим пучком).

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 следующим выражением

$$D = \sqrt[4]{\frac{E_{л} \cdot S_{УО} \cdot S_{пр} \cdot \rho_{УО} \cdot \tau_{пер} \cdot \tau_{пр}}{q \cdot E_{нор} \cdot \Omega_{пер} \cdot \Omega_{отр}}} , \quad (3)$$

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

Оценка параметров ЛЛС выполняется как при отсутствии световых помех, так и с учетом фоновой засветки от подстилающей поверхности планеты. Для расчета фоновой засветки используется модель, аппроксимирующая Солнце абсолютно черным телом с температурой 6000 К.

Используя модель АЧТ, можно определить спектральное распределение мощности излучения Солнца, испускаемой единицей поверхности, по закону Планка

$$r^*(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{kT \cdot \lambda}\right) - 1 \right]}, \quad (4)$$

где: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; λ – длина волны излучения; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К.

Для расчета фоновой засветки с использованием модели АЧТ служит выражение

$$P_{\text{фз}} = \frac{1}{\pi^2} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r^*(\lambda, T) \cdot d\lambda \cdot \rho_n \cdot \Omega_c \cdot \Omega_{\text{np}} \cdot S_{\text{np}} \cdot \tau_{\text{np}} \quad (5)$$

где: ρ_n – коэффициент отражения поверхности планеты (альбедо); $\Omega_c = 6,8 \cdot 10^{-5}$ ср – телесный угол, в котором наблюдается Солнце с Земли; Ω_{np} – телесный угол поля зрения приемной оптической системы.

Для выполнения измерений мощность излучения ЛЛС не должна быть ниже порогового уровня, определяемого отношением сигнал/шум q .

Основными источниками шума в ФПУ являются темновой шум и фоновый шум (создаваемый фоновой засветкой). Таким образом, результирующая величина эквивалентной мощности шума определяется выражением [4]

$$P_{\text{ш}} = \sqrt{P_T^2 + P_{\text{фз}}^2}. \quad (6)$$

Мощность темнового сигнала P_T зависит от типа и режима работы ФПУ. Методики расчета внутренних шумов и пороговой чувствительности ФПУ разных

типов приведены в [3,5]. Для упрощения примем, что собственные (темновые) шумы ФПУ очень малы.

Если принять, что темновой сигнал P_T значительно меньше сигнала от фона $P_{фз}$, то

$$P_{ш} \approx P_{фз}. \quad (7)$$

Тогда, при наличии фоновой засветки минимальная энергия полезного сигнала составит

$$E_{\min} = q \cdot P_{фз} \cdot t_u, \quad (8)$$

где: t_u – длительность зондирующего импульса.

В таком случае, для обнаружения полезного сигнала его мощность должна в q раз превышать мощность фоновой засветки. При оценке влияния фоновой засветки на характеристики ЛЛС будем использовать это допущение.

Программа «МИТРА» также позволяет рассчитать параметры ЛЛС, обеспечивающие безопасность для органов зрения при случайном облучении согласно требованиям, устанавливаемым ГОСТ Р 50723-94.

Если принять величину этой энергии равной допустимым пределам излучения (ДПИ), то тогда при постоянном значении E_L дистанция безопасного наблюдения будет равна

$$D = \sqrt{\frac{d_A^2 \cdot E_3}{E_{ДПИ} \cdot \gamma^2}}; \quad (9)$$

где: d_A – диаметр зрачка наблюдателя; $E_{ДПИ}$ – энергия, соответствующая ДПИ; $E_3 = E_L \cdot \tau_{пер}$ – энергия зондирующего пучка на выходе оптической системы ЛЛС.

Источник излучения принимается точечным, диаметр зрачка наблюдателя для длин волн $\lambda = 0,81 \dots 1,06$ мкм равен 7 мм, а для длины волны $\lambda = 1,54$ мкм – 1,1 мм.

В таблице 1 указаны ДПИ одиночных импульсов с длительностью в пределах $1 \cdot 10^{-9} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ секунд для четырех длин волн зондирующего излучения, рассчитанные в соответствии с нормами и методикой, изложенными в ГОСТ Р 50723-94 (для первого класса лазерной опасности).

Табл. 1.

Допустимые пределы излучения одиночных зондирующих импульсов в спектральном диапазоне 0,81...1,54 мкм согласно ГОСТ Р 50723-94

Длина волны, мкм	ДПИ, Дж
$\lambda = 0,81$	$3,31 \cdot 10^{-7}$
$\lambda = 0,91$	$5,30 \cdot 10^{-7}$
$\lambda = 1,06$	$2 \cdot 10^{-6}$
$\lambda = 1,54$	$8 \cdot 10^{-3}$

Графический интерфейс программы «МИТРА» представлен на рис. 1. Исходными данными для программы являются конструктивные параметры ЛЛС, характеристики объекта локации, а также рабочий спектральный диапазон и альbedo подстилающей поверхности планеты.

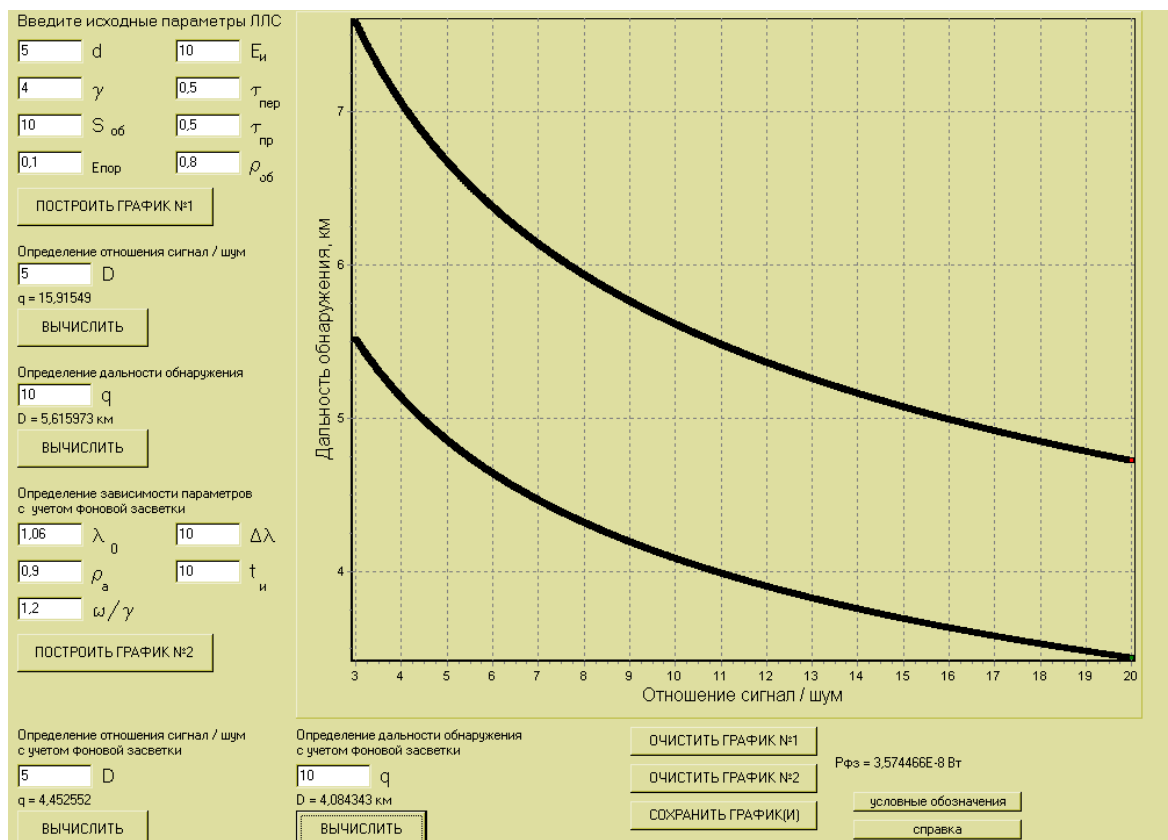


Рис. 1. Графический интерфейс программы «МИТРА»

Программа представлена в виде главного (управляющего) окна, которое вызывает дополнительные окна с выбранной зависимостью параметров ЛЛС. Для работы выбирается вкладка, соответствующая рассматриваемому случаю. Для расчета зависимости двух параметров необходимо ввести значения остальных конструктивных параметров ЛЛС. Программа позволяет построить графики, иллюстрирующие зависимость выбранных параметров.

Результаты моделирования

Была выполнена оценка параметров бортовой ЛЛС при работе по точечному диффузно рассеивающему объекту с площадью поверхности $S_{об} = 10 \text{ м}^2$ и коэффициентом отражения $\rho_{об} = 0,8$. Принимается, что потери излучения в оптической системе ЛЛС составляют 50 %, т.е. $\tau_{пер} = \tau_{пр} = 0,5$.

При существующих конструкционных ограничениях диаметр приемного объектива принят равным $d_{об} = 5$ см. Для серийно выпускаемых ФПУ пороговая регистрируемая энергия составляет $E_{пор} = 10^{-16}$ Дж.

Получение достоверного измерения дальности возможно, когда отношение сигнал/шум q превышает единицу, на практике оно обычно не меньше $q = 3$ [3,6]. Для оценки принято значение $q = 10$, которому соответствуют вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала порядка 10^{-6} , что обеспечивает приемлемую надежность измерений.

На рис. 2 представлен график зависимости дальности обнаружения точечного диффузно отражающего объекта от угла расходимости зондирующего пучка ЛЛС γ . Энергия зондирующего импульса составляет $E_z = 5$ мДж ($E_l = 10$ мДж). На графике видно резкое падение дальности при увеличении γ .

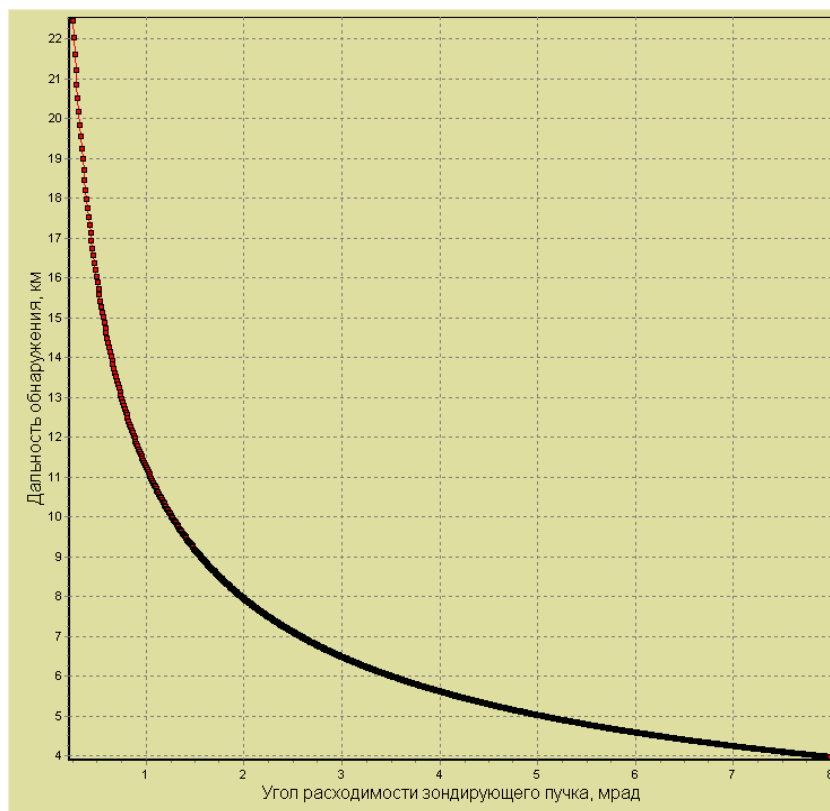


Рис. 2. Зависимость дальности обнаружения точечного диффузно отражающего объекта от расходимости зондирующего пучка ЛЛС γ

На рис. 3 и рис. 4 представлены графики зависимости дальности обнаружения объекта с диффузно отражающей поверхностью от E_n при $\gamma = 0,6$ мрад и $\gamma = 6,0$ мрад без учета и с учетом фоновой засветки (на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм). Поле зрения приемной оптической системы составляет соответственно $\omega = 0,9$ мрад и $\omega = 9,0$ мрад (для компенсации ошибок при юстировке передающего и приемного каналов выбирается $\omega = 1,5 \cdot \gamma$). Для оценки влияния фоновой засветки приняты величины: $\rho_n = 0,9$; $\Delta\lambda = 10$ нм; $t_u = 10$ нс.

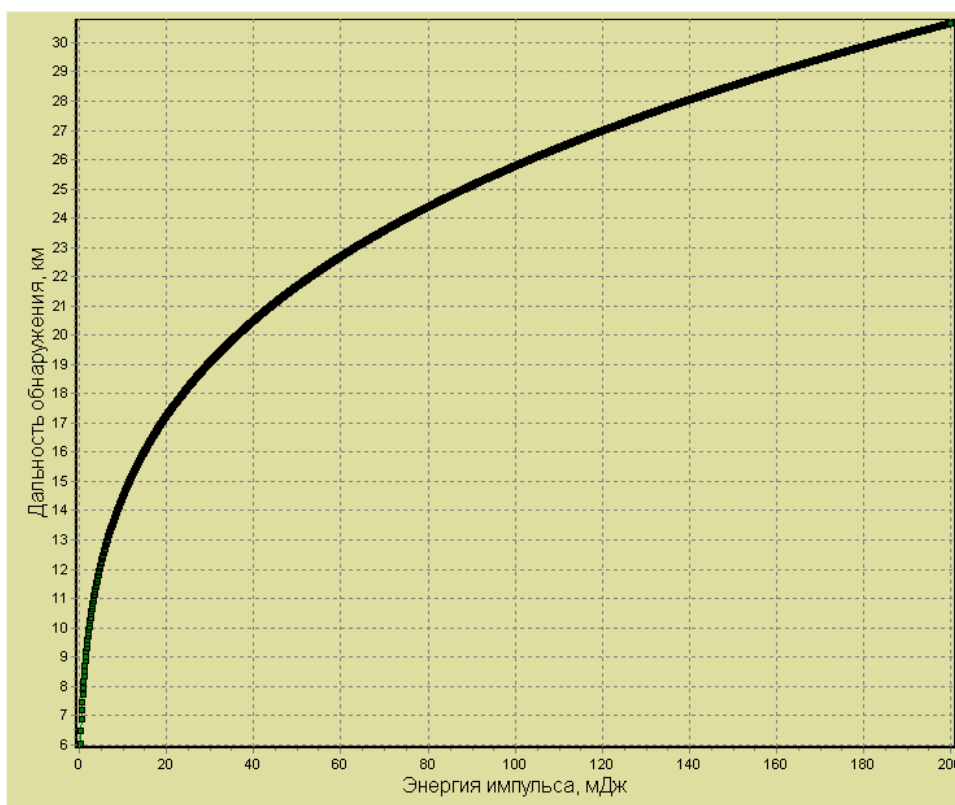


Рис. 3. Зависимость дальности обнаружения точечного диффузно отражающего объекта от энергии импульса E_n при расходимости зондирующего пучка $\gamma = 0,6$ мрад

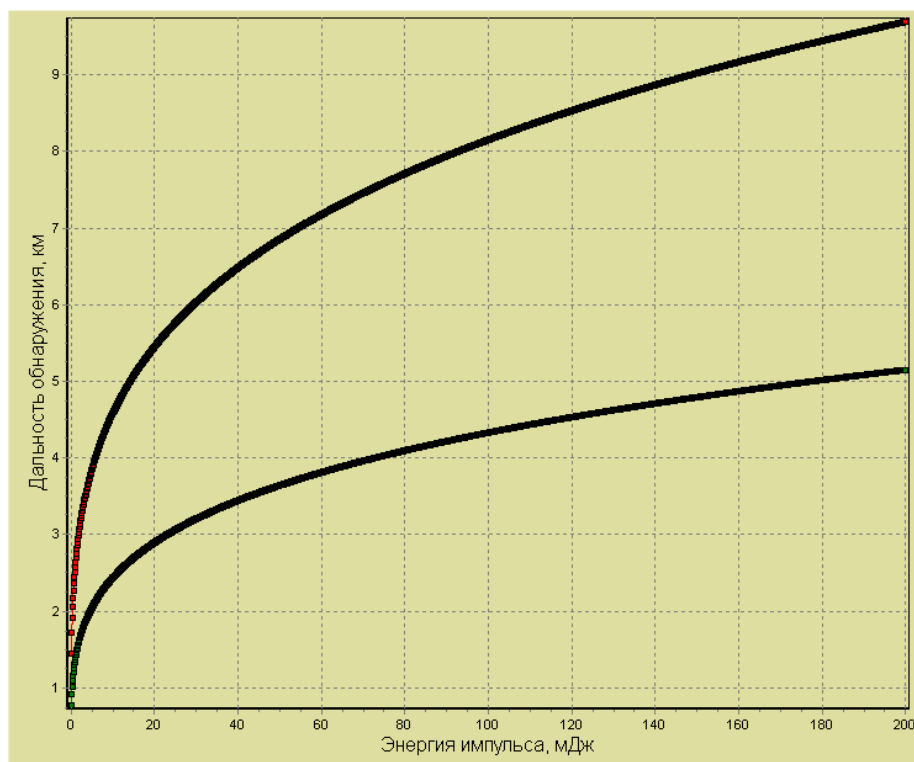


Рис. 4. Зависимость дальности обнаружения точечного диффузно отражающего объекта от энергии импульса E_l при расходимости зондирующего пучка $\gamma = 6,0$ мрад

На рис. 3 графики для зависимостей дальности обнаружения в отсутствие и при наличии фоновой засветки сливаются, то есть засветка не оказывает влияния на дальность ЛЛС (из-за узкого поля зрения приемной оптической системы: $\omega = 0,9$ мрад). На рис. 4 аналогичные графики представлены отдельно (верхний график соответствует отсутствию фоновой засветки, нижний график – ее наличию), что объясняется значительным увеличением поля зрения приемной оптической системы (до $\omega = 9,0$ мрад). В условиях фоновой засветки также требуется большая энергия зондирующего импульса.

Установка УО на пассивном КА увеличивает его эффективную площадь, что позволяет улучшить характеристики обнаружения. Проведена оценка параметров обнаружения при установке на пассивный объект УО с параметрами $S_{yO} = 6,23 \cdot 10^{-4}$ м², $\rho_{yO} = 0,85$ и $\alpha_{yO} = 10''$, остальные параметры прежние.

На рис. 5 представлены графики зависимости дальности обнаружения объекта с УО от энергии импульса при расходимости зондирующего пучка $\gamma = 6,0$ мрад без учета и с учетом фоновой засветки (на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм при тех же параметрах фона).

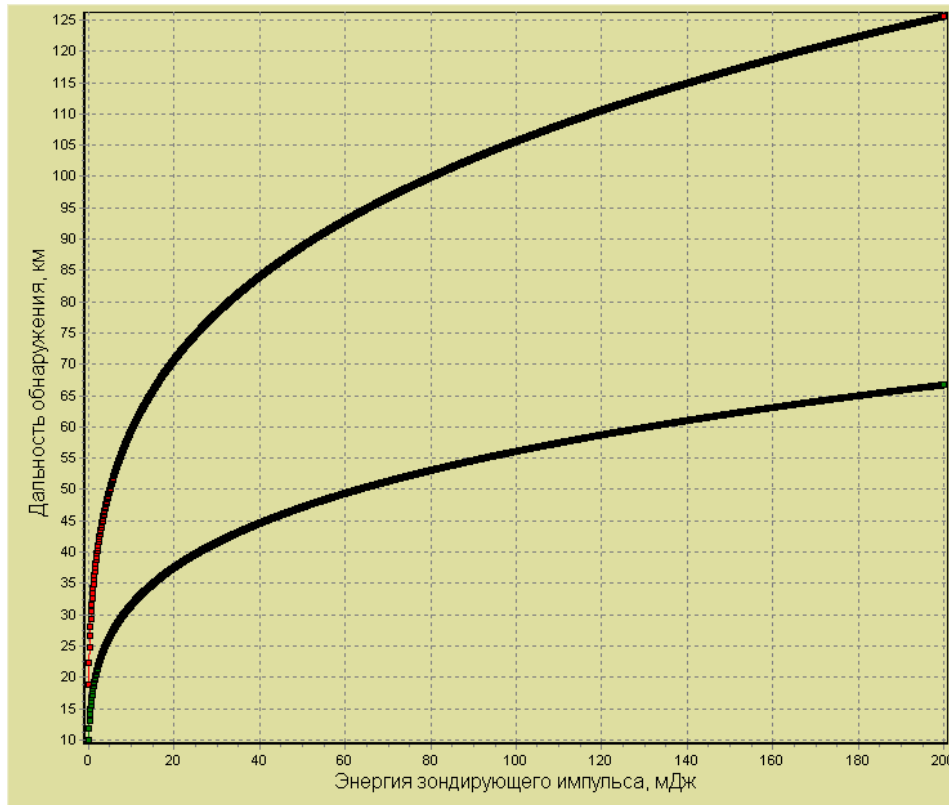


Рис. 5. Зависимость дальности обнаружения объекта с УО от энергии импульса E_d при расходимости зондирующего пучка $\gamma = 6,0$ мрад

Анализ рис. 5 показывает, что фоновая засветка снижает дальность измерений ЛЛС (нижний график) по сравнению с работой в условиях отсутствия помех (верхний график). Но при этом сравнение рис. 5 с рис. 2-4 показывает, что использование УО позволяет значительно снизить энергию зондирующего импульса даже в условиях фоновой засветки.

В то же время использование узких зондирующих пучков часто приводит к превышению норм лазерной безопасности. На рис. 6 и рис. 7 представлены графики

зависимости дистанции безопасного наблюдения зондирующего пучка с $E_3 = 5$ мДж от расходимости γ для длин волн $\lambda = 1,06$ мкм и $\lambda = 1,54$ мкм соответственно.

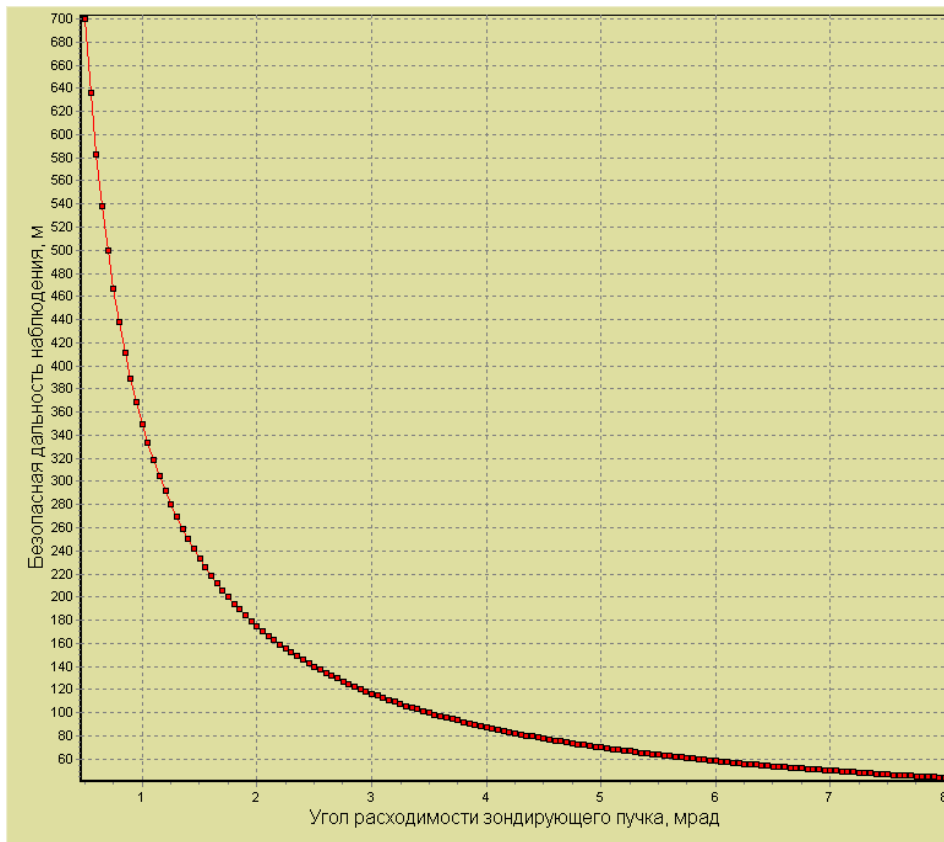


Рис. 6. Зависимость дистанции безопасного наблюдения от расходимости зондирующего пучка γ для длины волны $\lambda = 1,06$ мкм

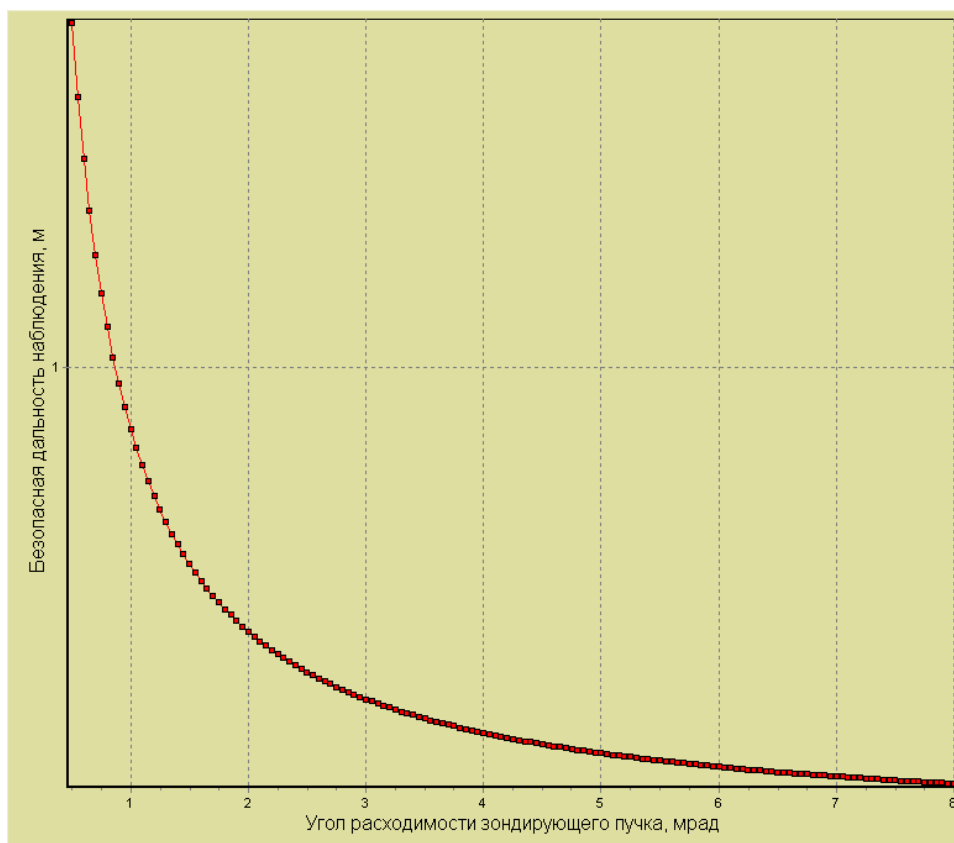


Рис. 7. Зависимость дистанции безопасного наблюдения от расходимости зондирующего пучка γ для длины волны $\lambda = 1,54$ мкм

При расширении диаграммы зондирующего излучения для $\lambda = 1,06$ мкм дистанция безопасного наблюдения заметно снижается. Для $\lambda = 1,54$ мкм зондирующее излучение остается в безопасных пределах (дальность безопасного наблюдения около 1 м) даже при его малой расходимости ($\gamma < 1,0$ мрад). Также, большое значение ДПИ на этой длине волны позволяет использовать широкие зондирующие пучки с большими энергиями импульса.

Следует отметить, что поиск оптимальной величины расходимости зондирующего пучка является серьезной проблемой при разработке ЛЛС.

Узкий зондирующий пучок кроме увеличения дальности локации и снижения безопасности подсветки создает сложности, связанные с работой по подвижным объектам. При наведении узкого зондирующего пучка на высокодинамичный объект

возможен промах [6]. С этим связана задача удержания объекта в створе зондирующего пучка при имеющейся точности поддержания ориентации активного КА – носителя ЛЛС. В этом случае разработчику приходится идти на увеличение диаграммы зондирующего пучка и поля зрения приемного канала.

Выводы и рекомендации

В работе были исследованы характеристики бортовых ЛЛС, используемых для управления сближением и стыковкой КА.

На основе «классического» уравнения лазерной локации и приближения АЧТ для вычисления фоновой засветки от подстилающей поверхности планеты была разработана модель, которая была использована в программе «МИТРА». Данная программа позволяет исследовать характеристики ЛЛС при работе по диффузно отраженному сигналу от корпуса объекта и при использовании УО, в отсутствие световых помех и при наличии фоновой засветки от подстилающей поверхности планеты. Также с помощью программы «МИТРА» можно выполнить оценку выполнения требований лазерной безопасности в спектральном диапазоне 0,81...1,54 мкм согласно ГОСТ Р 50723-94.

Исследовано влияние расходимости зондирующего пучка и на дальность локации по диффузно отраженному сигналу, влияние фоновой засветки на дальность локации по диффузно отраженному сигналу и с использованием УО при допущении, что мощность фоновых шумов значительно превышает мощность собственных тепловых шумов ФПУ.

Установлено, что использование УО позволяет обеспечить дальность измерений ЛЛС в диапазоне 20...55 км без превышения зондирующими импульсами ДПИ, заданных нормами лазерной безопасности. Использование «безопасной» длины волны 1,54 мкм позволяет использовать широкие диаграммы зондирующего излучения с одновременным увеличением энергии импульса, что в свою очередь снижает требования к наведению и удержанию пучка подсветки на объекте.

Результаты моделирования, полученные при оценке характеристик бортовой лазерной локационной аппаратуры, разрабатываемой для перспективных пилотируемых КА, показали, что программу «МИТРА» можно рекомендовать к широкому применению в проектных работах.

Библиографический список

1. Старовойтов Е.И., Воробьев С.А. Оценка уровня фоновой засветки для оптико-электронной системы обеспечения сближения и стыковки космических аппаратов при межпланетных полетах // МГОУ-XXI-Новые технологии. 2009. № 5–6. С.26–32

2. Старовойтов Е.И., Савчук Д.В. Парето-оптимизация параметров бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана). 2013. №. 4. Электронное научно-техническое издание. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/574259.html> (дата обращения 06.06.13).

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

4. Назаров В.Н., Балашов И.Ф. Энергетическая оценка импульсных лазерных дальномеров. СПбГУИТМО, 2002. 38 с. Режим доступа:

http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=27 (дата обращения 19.01.12).

5. Лазерная дальнометрия / Л.А. Аспис, В.П. Васильев, В.Б. Волконский и др. // Под ред. В.П. Васильева и Х.В. Хинрикус. М.: Радио и связь, 1995. 256 с.

6. Ставров А.А., Поздняков М.Г. Импульсные лазерные дальномеры для оптико-локационных систем // Доклады БГУИР. 2003. Т.1. №2. С.59–65.