

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

**Н.В. Барышников**

**Р.О. Степанов**

**В.А. Лебедев**

stepanovr@bmstu.ru

graysid\_v@mail.ru

**МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**

---

### Аннотация

Предложен метод расчета характеристик фонового излучения при решении задач лазерной локации в инфракрасном диапазоне спектра. Описан процесс лазерной локации в инфракрасном диапазоне для случая протяженного однородного фона, который характеризуется излучательной способностью и абсолютной температурой. Выведены выражения для диффузно-отраженного лазерного и собственного теплового редуцированных потоков фонового излучения. Расчет редуцированного потока диффузно-отраженного лазерного излучения проведен с учетом особенностей основных схем построения лазерных локационных систем. Получено выражение для суммарного фонового потока излучения, в котором учтено влияние диффузно-отраженного зондирующего лазерного излучения и собственного теплового излучения подстилающей поверхности. Приведены графики зависимостей фоновых потоков излучения для нескольких типовых значений внутренних характеристик лазерной локационной системы (мощности источника лазерного излучения, конструктивных параметров приемной оптической системы) и внешних условий (абсолютной температуры и излучательной способности подстилающей фоновой поверхности). С учетом графиков зависимостей фоновых потоков определены предельные значения конструктивных параметров лазерных локационных систем и внешних условий, при которых значение собственного теплового редуцированного потока излучения значительно преобладает над значением диффузно-отраженного лазерного редуцированного потока излучения

### Ключевые слова

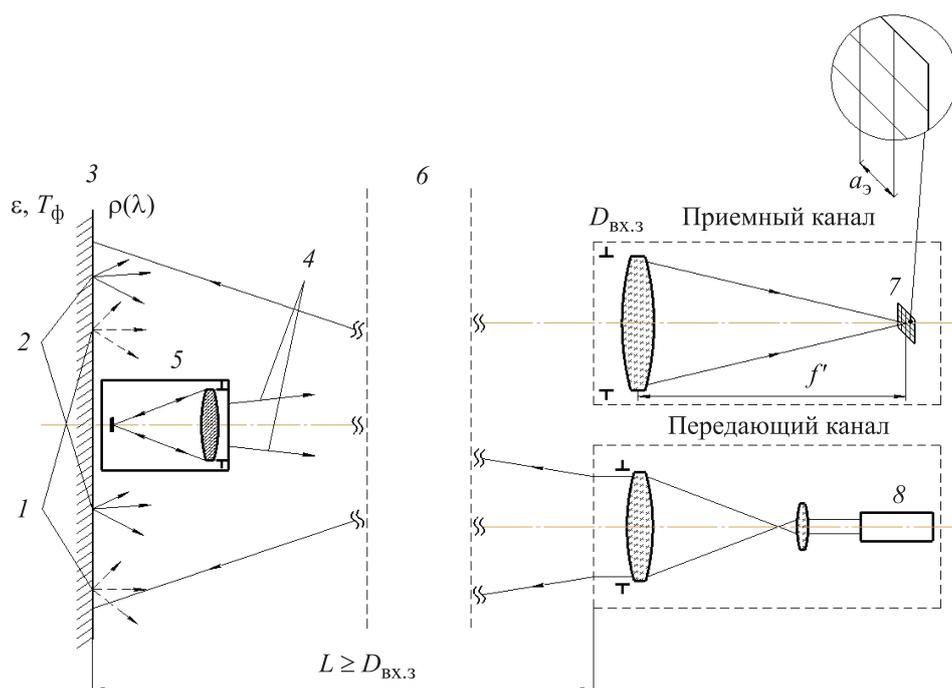
*Лазерная локация, эффект световозвращения, диффузно-отраженное излучение, тепловое излучение, инфракрасные приборы*

Поступила 05.07.2021

Принята 24.07.2021

© Автор(ы), 2022

**Введение.** В настоящее время в области оптико-электронного приборостроения отмечается повышенный интерес к созданию лазерных локационных систем (ЛЛС), работающих в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра, принцип действия которых основан на использовании эффекта световозвращения [1–6]. Системы такого типа предназначены для регистрации точечного ретроотраженного блика от лоцируемого оптико-электронного прибора (ОЭП) на фоне подстилающей поверхности (рис. 1).



**Рис. 1.** Обобщенная схема процесса лазерной локации:

- 1 — тепловое (собственное) излучение; 2 — диффузно-отраженное излучение;
- 3 — подстилающая фоновая поверхность; 4 — ретроотраженное излучение;
- 5 — лоцируемый ОЭП; 6 — слой пространства; 7 — ПИ; 8 — лазер

При постановке задачи лазерной локации с использованием оптико-электронных систем на основе эффекта световозвращения на первом этапе необходимо определить несколько ключевых характеристик, таких как световозвращательные характеристики лоцируемого ОЭП, характеристики фоновой подстилающей поверхности, атмосферы, приемного и передающего каналов ЛЛС. На основе полученных характеристик составляется итоговое уравнение локации, с помощью которого определяются предельные характеристики работы разрабатываемой ЛЛС.

Вопросы, посвященные особенностям расчета световозвращательных характеристик лоцируемого ОЭП, рассмотрены в [7]. Цель настоящей

*работы* — привести результаты исследования особенностей расчета характеристик фоновой подстилающей поверхности.

В большинстве случаев задача лазерной локации сводится к определению координат удаленных одиночных ОЭП на фоне подстилающей поверхности. В качестве подстилающих поверхностей могут выступать как естественные (земля, лед, песок, камень), так и искусственные (бетонные стены зданий, наружные борта транспортных средств) фоны. Поэтому в первом практическом приближении фоновую поверхность допустимо представить как протяженный однородный объект, который характеризуется излучательной способностью  $\varepsilon(\lambda, T_{\text{ф}})$  и коэффициентом отражения на длине волны излучения подсвета  $\rho(\lambda)$ .

Как правило, при работе ЛЛС одновременно регистрируются различные фоновые излучения — лазерное излучение, диффузно-отраженное от подстилающей поверхности, и собственное тепловое излучение фона. Для ЛЛС, работающих в ИК-диапазоне, значительно (по сравнению с видимым диапазоном) увеличивается собственное излучение подстилающей поверхности, поскольку при типовых значениях температуры фона ( $t = 0 \dots 100$  °С) максимум теплового излучения приходится на средний (СрИК,  $\lambda = 3 \dots 5$  мкм) и дальний (ДлИК,  $\lambda = 8 \dots 12$  мкм) ИК-диапазоны, соответствующие спектральному диапазону работы ЛЛС. В связи с этим при решении задачи лазерной локации ОЭП ИК-диапазона одним из основополагающих факторов является соотношение между диффузно-отраженным и собственным потоками излучения фоновой подстилающей поверхности.

**Собственное тепловое излучение фона.** Рассмотрим предлагаемый метод расчета фонового потока теплового излучения от подстилающей поверхности. Подстилающая поверхность — однородное протяженное серое тело, характеризующееся излучательной способностью  $\varepsilon(\lambda, T_{\text{ф}})$  и температурой  $T_{\text{ф}}$ . Тогда для схемы на рис. 1 редуцированный поток фонового излучения, падающий на один элемент матричного приемника излучения (МПИ) [8–11]:

$$\Phi_{\text{ф.т}} = \frac{D_{\text{вх.з}}^2}{L^2} A_{\text{ф}} \frac{\tau_{\text{атм}} \tau_{\text{пр}}}{4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\text{отн}}(\lambda) M_{\lambda}(\lambda, T_{\text{ф}}) d\lambda, \quad (1)$$

где  $D_{\text{вх.з}}$  — диаметр входного зрачка приемной оптической системы (ОС) ЛЛС;  $L$  — дальность работы ОС ЛЛС;  $A_{\text{ф}}$  — видимая площадь фона, соответствующая размеру одного элемента МПИ;  $\tau_{\text{атм}}$  — интегральный коэффициент пропускания атмосферы;  $\tau_{\text{пр}}$  — интегральный коэффициент про-

пускания приемной ОС ЛЛС;  $S_{\text{отн}}(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность МПИ;  $M_{\lambda}(\lambda, T_{\text{ф}})$  — спектральная энергетическая светимость подстилающей поверхности при температуре  $T_{\text{ф}}$ .

Для случая протяженного фона происходит полное перекрытие элементарного углового поля приемной ОС ЛЛС, т. е. поля зрения, соответствующего одному элементу МПИ ЛЛС. Полагая, что элементы МПИ ЛЛС имеют квадратную форму со стороной  $a_{\text{э}}$ , получаем

$$A_{\text{ф}} = (a_{\text{э}}\beta)^2 = \left( a_{\text{э}} \frac{L}{f'} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\beta$  — линейное увеличение приемной ОС ЛЛС;  $f'$  — фокусное расстояние приемной ОС ЛЛС.

Для возможности отдельного учета влияния излучательной способности и абсолютной температуры подстилающей поверхности представим спектральную энергетическую светимость подстилающей поверхности следующим образом:

$$M_{\lambda}(\lambda, T_{\text{ф}}) = \varepsilon(\lambda, T_{\text{ф}})M_{\lambda}^0(\lambda, T_{\text{ф}}). \quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon(\lambda, T_{\text{ф}})$  — спектральная излучательная способность подстилающей поверхности;  $M_{\lambda}^0(\lambda, T_{\text{ф}})$  — спектральная энергетическая светимость абсолютно черного тела (АЧТ) при температуре, равной температуре подстилающей поверхности  $T_{\text{ф}}$ .

В рассматриваемых условиях значение спектральной излучательной способности слабо зависит от длины волны и температуры подстилающей поверхности, поэтому ее можно полагать постоянной величиной, определяемой характеристиками материала подстилающей поверхности,  $\varepsilon(\lambda, T_{\text{ф}}) = \varepsilon$ . Тогда выражение (1) с учетом (2) и (3) примет вид

$$\Phi_{\text{ф.т}} = \varepsilon \left( \frac{D_{\text{вх.з}}}{f'} \right)^2 a_{\text{э}}^2 \frac{\tau_{\text{атм}}\tau_{\text{пр}}}{4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\text{отн}}(\lambda)M_{\lambda}^0(\lambda, T_{\text{ф}})d\lambda. \quad (4)$$

В общем случае коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_{\text{атм}}$  в (4) зависит от дальности работы ЛЛС  $\tau_{\text{атм}} = \tau_{\text{атм}}(L)$ , причем эта зависимость является монотонно убывающей. Прозрачность атмосферы является одним из главных факторов, которые ограничивают предельную дальность работы локационных систем. Поэтому при оценке влияния атмосферы допустимо рассмотреть «наихудший» случай и заменить зависимость  $\tau_{\text{атм}}(L)$  значением коэффициента пропускания, соответствующим предельной дальности работы ЛЛС  $\tau_{\text{атм}} = \tau_{\text{атм}}(L_{\text{max}}) = \text{const}$ . Следовательно,

итоговая формула для расчета редуцированного потока теплового излучения фона в приближении протяженной однородной подстилающей поверхности определяется лишь параметрами фона и внутренними параметрами приемной ОС ЛЛС.

**Диффузно-отраженное излучение фона на длине волны излучения подсвета.** Рассчитаем фоновый поток диффузно-отраженного лазерного излучения [5]. Будем полагать, что в рассматриваемом случае фон характеризуется коэффициентом отражения на длине волны излучения подсвета  $\rho(\lambda)$ . Обусловленная лазерным излучением подсвета освещенность пространства предметов на расстоянии  $L$

$$E_{\text{ф}} = \frac{4P_{\text{л}}}{\pi(\omega_{\text{п}}L)^2} \tau_{\text{атм}}\tau_{\text{п}}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{л}}$  — мощность лазерного источника излучения;  $\omega_{\text{п}}$  — угловая ширина диаграммы направленности передающей ОС ЛЛС;  $\tau_{\text{п}}$  — коэффициент пропускания передающей ОС ЛЛС.

Для упрощения расчетов в большинстве случаев пятно подсвета на фоновой поверхности можно полагать вторичным ламбертовым источником излучения. Тогда диффузно-отраженное излучение будет создавать освещенность входного зрачка приемной ОС ЛЛС:

$$E_{\text{вх.з}} = \rho(\lambda) \frac{4P}{\pi(\omega_{\text{п}}L)^2} \frac{A_{\text{ф}}}{\pi} \frac{\tau_{\text{атм}}^2 \tau_{\text{п}}}{L^2}. \quad (6)$$

Здесь  $A_{\text{ф}}$  — видимая площадь пятна подсвета на фоновой поверхности (рис. 2).

Редуцированный поток диффузно-отраженного фонового излучения на фоточувствительной поверхности МПИ будет определяться площадью входного зрачка и коэффициентом пропускания приемной ОС ЛЛС, а также относительной чувствительностью МПИ на длине волны излучения подсвета:

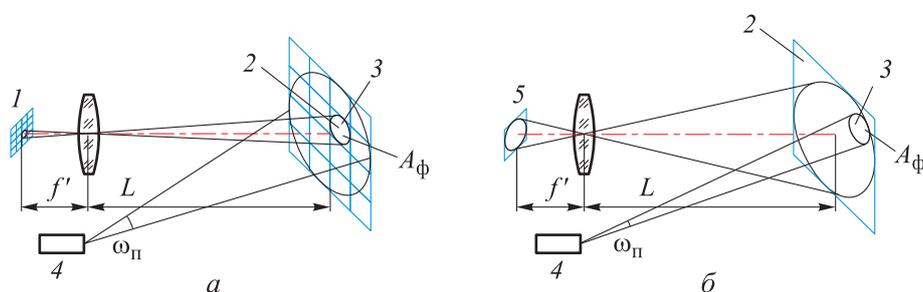
$$\Phi_{\text{ф.д}} = \rho(\lambda) \frac{4P}{\pi(\omega_{\text{п}}L)^2} \frac{A_{\text{ф}}}{\pi} \frac{\tau_{\text{атм}}^2 \tau_{\text{пр}} \tau_{\text{п}}}{L^2} \frac{\pi D_{\text{вх.з}}^2}{4} S_{\text{отн}}(\lambda). \quad (7)$$

Для использования (7) необходимо определить видимую площадь пятна подсвета на фоновой поверхности  $A_{\text{ф}}$ , для которой следует рассчитывать диффузно-отраженный фоновый поток. При проектировании ЛЛС принято рассматривать три основных типа построения ЛЛС в зависимости от соотношения диаграммы направленности  $\omega_{\text{п}}$  и поля зрения  $\omega_{\text{пр}}$ :

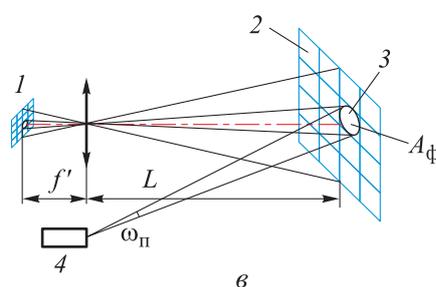
1) в системах первого типа «широкий–узкий» источник подсвета имеет широкую диаграмму направленности, освещающую всю рабочую область, а приемник — узкое (мгновенное) поле зрения  $\omega_{\text{п}} \gg \omega_{\text{пр}}$ ;

2) в системах второго типа «узкий–широкий» источник имеет узкую диаграмму направленности, а приемник излучения — широкое поле зрения, соответствующее полному угловому полю зрения всей системы  $\omega_{\text{п}} \ll \omega_{\text{пр}}$ ;

3) в системах третьего типа «узкий–узкий» источник и приемник имеют узкие согласованные между собой диаграмму направленности и поле зрения  $\omega_{\text{п}} \cong \omega_{\text{пр}}$ .



**Рис. 2.** К определению видимой площади пятна подсвета на фоновой поверхности  $A_{\text{ф}}$  для типов построения ЛЛС «широкий–узкий» (а), «узкий–широкий» (б), «узкий–узкий» (в): 1 — МПИ; 2 — приведенный пиксель в плоскости объектов; 3 — диаметр лазерного пятна подсвета; 4 — лазер; 5 — ПИ



Для каждого типа системы определим итоговый вид расчетной формулы (7) с учетом характерных особенностей систем.

Для систем первого типа видимая площадь пятна подсвета на фоновой поверхности будет определяться через приведенный размер одного элемента МПИ. Полагая, что элементы МПИ имеют квадратную форму со стороной  $a_{\text{э}}$ , получаем

$$A_{\text{ф}} = \left( a_{\text{э}} \frac{L}{f'} \right)^2. \quad (8)$$

В общем случае коэффициент отражения  $\rho$  и излучательная способность  $\varepsilon$  нагретого тела связаны соотношением [12]:

$$\varepsilon = (1 - \rho)(1 - e^{-kl}). \quad (9)$$

Здесь  $k$  — коэффициент поглощения материала нагретого тела;  $l$  — длина хода луча в материале тела.

Описанные выше типовые подстилающие поверхности являются непрозрачными телами, для которых  $kl \gg 1$ . Тогда (9) можно переписать в наиболее простом виде

$$\varepsilon = 1 - \rho, \quad (10)$$

т. е. коэффициент отражения фона можно определить, зная его излучательную способность.

Для рассматриваемого случая выражение (7) с учетом (8) и (10) имеет вид

$$\Phi_{\text{ф.д}} = (1 - \varepsilon) \frac{P}{\pi(\omega_{\text{п}}L)^2} a_{\text{э}}^2 \tau_{\text{атм}}^2 \tau_{\text{пр}} \tau_{\text{п}} \left( \frac{D_{\text{вх.з}}}{f'} \right)^2 S_{\text{отн}}(\lambda). \quad (11)$$

Для систем второго типа видимая площадь пятна подсвета на фоновой поверхности будет определяться через диаметр лазерного пятна подсвета  $D$ , поскольку в системах указанного типа мгновенное угловое поле зрения системы определяется угловым полем зрения передающей ОС ЛЛС:

$$A_{\text{ф}} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{4} (\omega_{\text{п}}L)^2. \quad (12)$$

В таком случае выражение (7) с учетом (10) и (12) примет вид

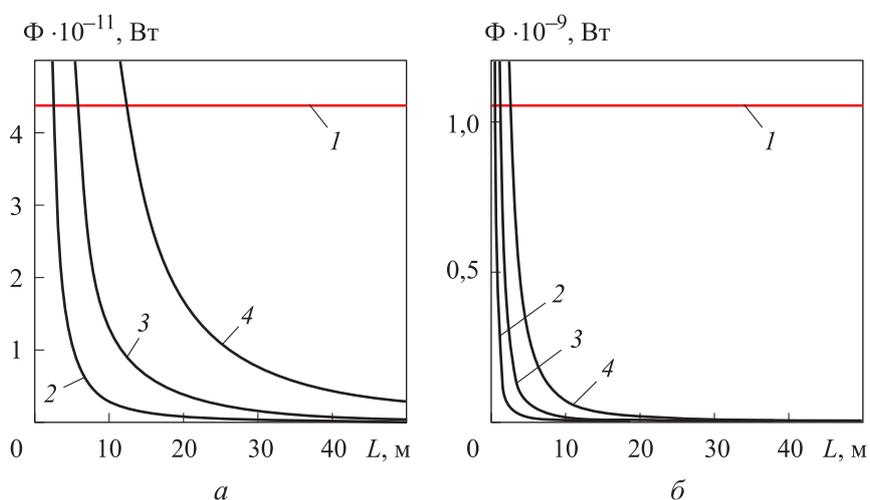
$$\Phi_{\text{ф.д}} = (1 - \varepsilon) \frac{4PD_{\text{вх.з}}^2}{L^2} \tau_{\text{атм}}^2 \tau_{\text{пр}} \tau_{\text{п}} S_{\text{отн}}(\lambda). \quad (13)$$

В системах третьего типа диаграмма направленности источника и поле зрения приемника согласованы между собой. Следовательно, приведенный размер одного элемента МПИ будет равен диаметру лазерного пятна подсвета и расчет можно проводить по формулам (11) и (13), которые для таких систем будут давать одинаковый результат.

**Сравнительный анализ влияния собственного и диффузно-отраженного излучения при лазерной локации.** Для сравнения собственного и диффузно-отраженного фоновых потоков определим их типовые значения при лазерной локации в ИК-диапазоне. Одной из главных задач лазерной локации является не только определение наличия или отсутствия ОЭП в поле зрения ЛЛС, но и определение их пространственного положения (угловых координат) на фоне подстилающей поверхности. Поэтому вновь разрабатываемая ЛЛС рассматривается в первую очередь как изображающая система. В связи с широким развитием технологий производства МПИ ИК-диапазона изображающие системы целесообразно проектировать

на основе систем первого типа «широкий–узкий». Тогда влияние диффузно-отраженного фонового излучения будет оцениваться по (11). Проведем моделирование для следующих параметров элементов ЛЛС и внешних условий [13–15]: излучательная способность фоновой поверхности  $\varepsilon = 0,1 - 0,9$ ; диаметр входного зрачка приемной ОС ЛЛС  $D_{\text{вх.з}} = 100 \dots 200$  мм; фокусное расстояние приемной ОС ЛЛС  $f' = 200 \dots 300$  мм; коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_{\text{атм}} = 0,6$ ; коэффициент пропускания приемной ОС ЛЛС  $\tau_{\text{пр}} = 0,9$ ; коэффициент пропускания передающей ОС ЛЛС  $\tau_{\text{п}} = 0,9$ ; температура фоновой поверхности  $T_{\text{ф}} = -50 \dots 50$  °С; мощность лазерного источника излучения  $P_{\text{л}} = 0,1 \dots 5,0$  Вт; угловая ширина диаграммы направленности передающей ОС ЛЛС  $\omega_{\text{п}} = 1 \dots 2$ °.

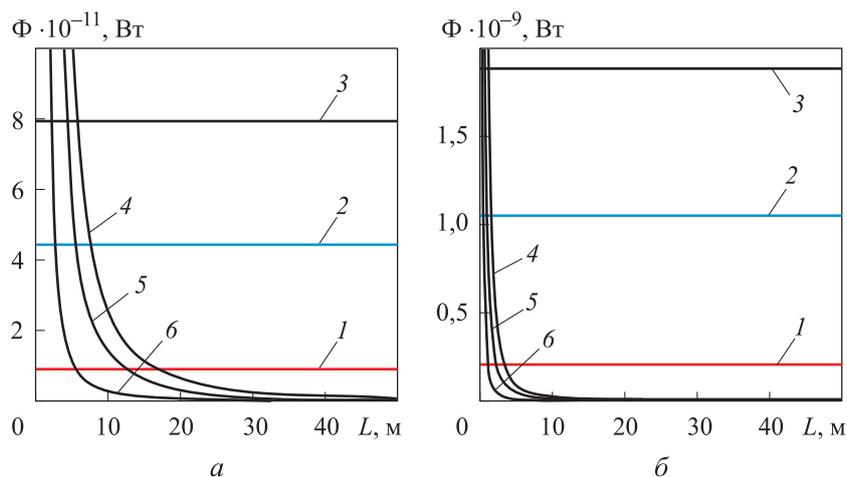
Проведем анализ зависимостей собственного теплового и диффузно-отраженного фоновых потоков от мощности лазерного источника (рис. 3). На расстояниях несколько десятков метров (до 20 м для СрИК и до 10 м для ДЛИК) диффузно-отраженное лазерное излучение значительно превышает тепловое излучение фона. При увеличении дальности работы до сотен метров вклад диффузно-отраженного лазерного излучения резко уменьшается (на два порядка) по сравнению с тепловым фоновым потоком. Таким образом, при расчете фонового потока при проектировании ЛЛС, работающих на дальностях более 100 м, допустимо пренебречь диффузно-отраженным излучением и учитывать только величину потока теплового излучения фона  $\Phi_{\text{ф.т}}$  (4). В системах с мощными (до десятков ватт) лазер-



**Рис. 3.** Зависимости собственного (1) и диффузно-отраженного фоновых потоков от дальности работы системы при значениях мощности лазерного источника при  $P_{\text{л}} = 0,2$  (2), 1,0 (3), 5,0 Вт (4) для СрИК- (а) и ДЛИК-диапазонов (б)

ными источниками излучения, которые предполагается использовать во всем диапазоне расстояний (от десятков метров до нескольких километров), требуется учитывать резкое возрастание величины фонового потока на малых дальностях (10...20 м). Эта величина может превысить верхнюю границу динамического диапазона приемника излучения, что с большой вероятностью может приводить к «засветке» всего рабочего поля приемной ОС и невозможности корректной работы ЛЛС. Для устранения указанного недостатка при работе на малых дальностях в ЛЛС следует использовать систему регулируемого уменьшения мощности лазера (активной подстройки мощности), что позволит уменьшить диффузное лазерное излучение до допустимых значений во всем диапазоне дальностей, представляющих практический интерес.

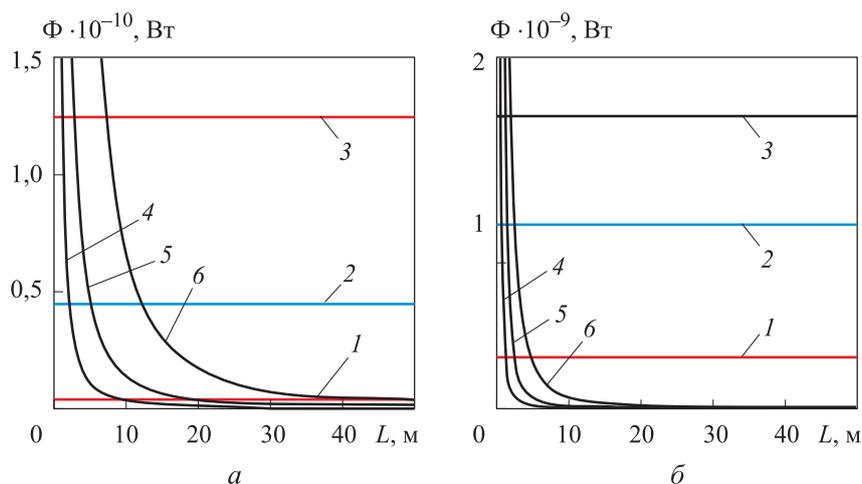
Проведем анализ зависимости собственного теплового и диффузно-отраженного фоновых потоков от излучательной способности фона (рис. 4). При увеличении излучательной способности фона собственное тепловое излучение начинает в значительной степени преобладать над диффузно-отраженным. Это объясняется тем, что согласно формуле (10) излучательная способность  $\varepsilon$  и коэффициент отражения  $\rho$  связаны обратной зависимостью. Следовательно, в случае, когда материал подстилающей поверхности близок по параметрам к АЧТ ( $\varepsilon \rightarrow 1$ ), фоновый поток допустимо рассчитывать через поток собственного теплового излучения фона (4). Если излучательная способность фона мала ( $\varepsilon \ll 1$ ), то при расчете фонового потока в первую очередь необходимо учитывать диффузно-отраженное лазерное излучение (11). В этом случае также необходимо



**Рис. 4.** Зависимости собственного (1–3) и диффузно-отраженного (4–6) фоновых потоков от дальности работы ЛЛС при  $\varepsilon = 0,1$  (1, 4),  $0,5$  (2, 5) и  $0,9$  (3, 6) материала фона для СрИК- (а) и ДЛИК-диапазонов (б)

учесть, что диффузно-отраженный поток сильно зависит от дальности работы, и при работе на малых расстояниях (несколько десятков метров) для уменьшения фонового потока следует включить в состав ЛЛС систему активной подстройки мощности.

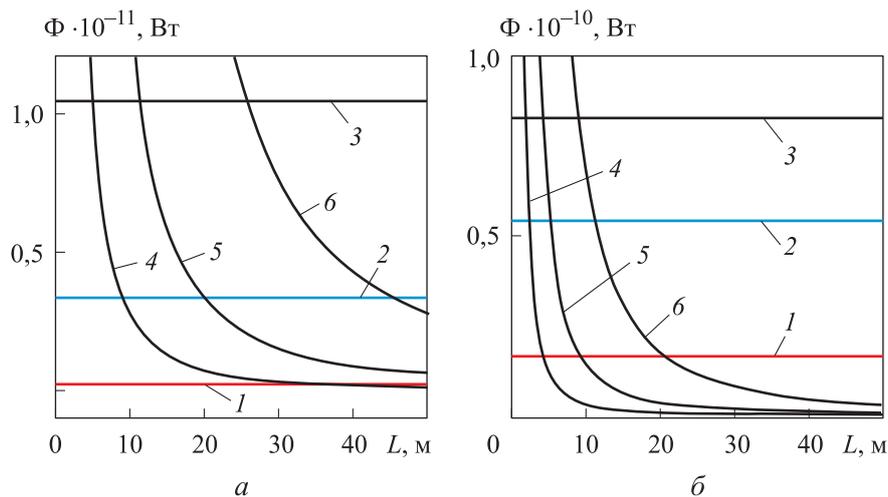
Проанализируем влияние на собственную тепловую и диффузно-отраженную составляющие фонового потока абсолютной температуры подстилающей поверхности с учетом мощности лазерного излучения подсвета (рис. 5). Для ИК-диапазона собственное тепловое излучение фона сильно зависит от его температуры и может изменяться на несколько порядков, особенно при работе ЛЛС в ДЛИК-диапазоне. Если температура подстилающей поверхности превышает  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то фоновый поток рекомендуется рассчитывать по (4). Следует учитывать, что выбранная в рассмотренном примере максимальная температура фона  $T_{\text{ф}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  не является крайним случаем, и при более высоких значениях температуры использование формулы (4) становится еще более корректным.



**Рис. 5.** Зависимости собственного при  $T_{\text{ф}} = -40$  (1),  $20$  (2),  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (3) и диффузно-отраженного при  $P_{\text{л}} = 0,2$  (4),  $1,0$  (5),  $5,0\text{ Вт}$  (6) фоновых потоков от дальности работы ЛЛС для СРИК- (а) и ДЛИК-диапазонов (б)

Полученные высокие значения потоков теплового излучения обусловлены в первую очередь широким (по сравнению с лазерным излучением) спектральным диапазоном работы ЛЛС, который составляет несколько микрометров (СРИК  $3\text{...}5\text{ мкм}$ , ДЛИК  $8\text{...}12\text{ мкм}$ ). Для уменьшения влияния на ЛЛС собственного излучения фона можно использовать интерференционные фильтры, согласованные со спектром излучения лазерного источника и установленные в приемную ОС ЛЛС. Проанализируем влия-

ние на собственный тепловой и диффузно-отраженный фоновый поток абсолютной температуры подстилающей поверхности и мощности лазерного излучения подсвета при установке в приемный канал ЛЛС интерференционного фильтра со спектральной шириной рабочей полосы пропускания по уровню  $0,5 \Delta\lambda_{0,5} = 0,2$  мкм (рис. 6). При установке в прием-



**Рис. 6.** Зависимости собственного при  $T_\phi = -40$  (1),  $20$  (2),  $50$  °С (3) и диффузно-отраженного  $P_l = 0,2$  (4),  $1,0$  (5),  $5,0$  Вт (6) фоновых потоков от дальности работы ЛЛС при наличии в приемном канале интерференционного светофильтра для СрИК- (а) и ДлИК-диапазонов (б)

ную ОС интерференционного светофильтра тепловое излучение фона уменьшается на порядок для обоих диапазонов. Следует отметить, что современный технологический уровень позволяет при необходимости изготовить светофильтр со спектральной шириной рабочей полосы пропускания  $0,5$  в несколько десятков нанометров. Это дает возможность эффективно бороться с тепловым излучением фона и учитывать только диффузное отражение от подстилающей поверхности. Однако установка такого светофильтра имеет недостатки. Главным из них является невозможность получения теплового изображения рабочего поля зрения ЛЛС в связи со значительным уменьшением теплового потока, прошедшего через приемную ОС ЛЛС. Поскольку принцип работы ЛЛС ИК-диапазона подразумевает регистрацию локационного изображения, на котором видны ретроотраженные блики от ОЭП на фоне теплового изображения подстилающей поверхности зоны наблюдения, рассмотренные выше факторы необходимо в обязательном порядке учитывать на этапе проектирования ЛЛС.

**Заключение.** Разработан метод анализа особенностей расчета характеристик фонового излучения при решении задач лазерной локации в ИК-диапазоне, с использованием которого проведена оценка влияния диффузно-отраженного и собственного излучения фона. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что на небольших расстояниях (до 50 м) и при небольших значениях абсолютной температуры ( $-50...0$  °С) подстилающей поверхности поток диффузно-отраженного фонового излучения преобладает над собственным тепловым потоком фонового излучения. Следовательно, при таких условиях расчет полного фонового потока излучения допустимо проводить по полученным формулам (11) и (13) для расчета диффузно-отраженного потока с учетом выбранной схемы построения ЛЛС. Для уменьшения полного фонового потока рекомендуется предусмотреть в разрабатываемой ЛЛС систему активной подстройки мощности лазерного источника излучения. При увеличении дальности работы (от сотен метров до нескольких километров) или при увеличении температуры фона (более 20 °С) расчет полного фонового потока следует проводить по (4) для собственного излучения подстилающей поверхности. В таком случае уменьшить поток теплового излучения позволяет включение в приемную ОС интерференционного светофильтра, согласованного со спектром излучения лазерного источника. Однако следует учитывать, что в системах со светофильтрами резко уменьшается динамический диапазон работы и ухудшаются пороговые характеристики ЛЛС.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Вязовых М.В. и др. Анализ возможности дистанционного обнаружения камер скрытого видеонаблюдения на основе эффекта световозвращения. *Информационно-измерительные и управляющие системы*, 2005, № 4-5, с. 76–86.
- [2] Карасик В.Е., Вун Е Тэ. Анализ возможности повышения помехоустойчивости лазерных локационных систем, использующих эффект световозвращения при обнаружении скрытой камеры видеонаблюдения. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2014, № 6, с. 54–59.
- [3] Бокшанский В.Б., Карасик В.Е., Таранов М.А. Автоматическое обнаружение световозвращателей с помощью лазерных локационных систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2011, № 2 (83), с. 25–35.
- [4] Бокшанский В.Б., Вун Е Тэ, Вязовых М.В. и др. Повышение помехоустойчивости лазерных локационных систем при автоматическом обнаружении световозвращателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 9, с. 142–150.  
DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-9-360>

- [5] Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
- [6] Вязовых М.В., Карасик В.Е., Орлов В.М. Анализ активной системы видения со световозвращателем в рассеивающей среде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 4 (81), с. 3–17.
- [7] Барышников Н.В., Степанов Р.О., Лебедев В.А. Разработка модели для описания индикатрисы ретроотражения оптико-электронных приборов инфракрасного диапазона. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 1 (124), с. 4–19. DOI: <http://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-1-4-19>
- [8] Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М., Логос, 2004.
- [9] Ллойд Дж. Системы тепловидения. М., Мир, 1978.
- [10] Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. Казань, Изд-во Казанск. ун-та, 2000.
- [11] Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М., Мир, 1998.
- [12] Голубь Б.И., Пахомов И.И., Хорохоров А.М. Собственное излучение элементов оптических систем оптико-электронных приборов. М., Машиностроение, 1978.
- [13] Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М., Сов. радио, 1978.
- [14] Волф У., Цисис Г., ред. Справочник по инфракрасной технике. Т. 1. Физика ИК-излучения. М., Мир, 1995.
- [15] Волф У., Цисис Г., ред. Справочник по инфракрасной технике. Т. 4. Проектирование инфракрасных систем. М., Мир, 1999.

**Барышников Николай Васильевич** — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Степанов Родион Олегович** — канд. техн. наук, заместитель директора НИИ «Радиоэлектроники и лазерной техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Лебедев Василий Андреевич** — ассистент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Барышников Н.В., Степанов Р.О., Лебедев В.А. Анализ особенностей расчета характеристик фонового излучения при решении задач лазерной локации в инфракрасном диапазоне спектра. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 1 (138), с. 4–19.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-1-4-19>

## ANALYSIS OF THE FEATURES OF CALCULATING THE BACKGROUND RADIATION CHARACTERISTICS WHEN SOLVING PROBLEMS OF LASER LOCATION IN THE INFRARED RANGE OF THE SPECTRUM

N.V. Baryshnikov

R.O. Stepanov

V.A. Lebedev

stepanovr@bmstu.ru

graysid\_v@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The article considers the proposed method for calculating the background radiation characteristics when solving problems of laser location in the infrared range of the spectrum. The process of laser ranging in the infrared range is described for the case of an extended homogeneous background, which is characterized by emissivity and absolute temperature. Expressions for the diffusely reflected laser and intrinsic thermal reduced fluxes of background radiation are derived. The calculation of the reduced flux of diffusely reflected laser radiation was carried out taking into account the features of the main schemes for constructing laser location systems (LLS). An expression is obtained for the total background radiation flux, which takes into account the effect of diffusely reflected probing laser radiation and the intrinsic thermal radiation of the underlying surface. Graphs of dependences of background radiation fluxes for several typical values of the laser location system internal characteristics (power of the laser radiation source, design parameters of the receiving optical system) and external conditions (absolute temperature and emissivity of the underlying background surface) are presented. Taking into account the dependence graphs of background fluxes, the limiting values of the design parameters of laser location systems and external conditions were determined, under which the value of the intrinsic thermal reduced radiation flux significantly prevails over the value of the diffusely reflected laser reduced radiation flux

### Keywords

*Laser location, retroreflection effect, diffusely reflected radiation, thermal radiation, infrared devices*

Received 05.07.2021

Accepted 24.07.2021

© Author(s), 2022

---

### REFERENCES

- [1] Baryshnikov N.V., Bokshanskiy V.B., Vyazovykh M.V., et al. Analysis of possibility of CCTV remote detection based on light retroreflection effect. *Informatsionno-*

*izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-Measuring and Control Systems], 2005, no. 4-5, pp. 76–86 (in Russ.).

[2] Karasik V.E., Vun E Te. Analysis possibility to increase noise immunity laser location systems using retroreflection radiation effect on the detection of hidden surveillance cameras. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2014, no. 6, pp. 54–59 (in Russ.).

[3] Bokshanskiy V.B., Karasik V.E., Taranov M.A. Automatic detection of retroreflectors using laser location systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2011, no. 2 (84), pp. 25–35 (in Russ.).

[4] Bokshanskiy V.B., Vun E Te, Vyazovych M.V., et al. Higher noise stability of laser location systems at automatic detection of retroreflectors. *Inzhenerniy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Education], 2012, no. 9, pp. 142–150 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-9-360>

[5] Karasik V.E., Orlov V.M. Lokatsionnye lazernye sistemy videniya [Locating laser vision systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2013.

[6] Vyazovych M.V., Karasik V.E., Orlov V.M. Analysis of active vision system with light reflector in scattering medium. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2010, no. 4 (81), pp. 3–17 (in Russ.).

[7] Baryshnikov N.V., Stepanov R.O., Lebedev V.A. Developing a model to describe the retroreflection phase function in infrared optoelectronic devices. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 1 (124), pp. 4–19 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-1-4-19>

[8] Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. Infrakrasnye sistemy “smotryashchego” tipa [“Looking” type infrared systems]. Moscow, Logos Publ., 2004.

[9] Lloyd J.M. Thermal imaging systems. Springer, 1975.

[10] Aleev R.M., Ivanov V.P., Ovsyannikov V.A. Osnovy teorii analiza i sinteza vozduшной teplovizionnoy apparatury [Theory fundamentals of analysis and synthesis of airborne thermal imaging equipment]. Kazan, Kazan Univ. Publ., 2000.

[11] Gaussorgues G. La thermographie infrarouge. Principes, technologies, applications. Lavoisier Tec & Doc, 1999.

[12] Golub B.I., Pakhomov I.I., Khorokhorov A.M. Sobstvennoe izluchenie elementov opticheskikh sistem optiko-elektronnykh priborov [Intrinsic emission of elements of optical systems in optoelectronic devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978.

[13] Kriksunov L.Z. Spravochnik po osnovam infrakrasnoy tekhniki [Handbook on basics of infrared technics]. Moscow, Sovetskoe radio, 1978.

[14] Wolfe W.L., Zissis G.J., eds. The infrared handbook. General dynamics. SPIE PRESS, 1965.

[15] Wolfe W.L. Handbook of military infrared technology. Office of Naval Research Department of Navy Washington, D.C., 1985.

**Baryshnikov N.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Stepanov R.O.** — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Director of Scientific Research Institute of Radioelectronic and Laser Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Lebedev V.A.** — Assistant, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Baryshnikov N.V., Stepanov R.O., Lebedev V.A. Analysis of the features of calculating the background radiation characteristics when solving problems of laser location in the infrared range of the spectrum. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2022, no. 1 (138), pp. 4–19 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-1-4-19>