

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИНДИКАТРИСЫ РЕТРООТРАЖЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

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

Предложена методика модельного описания индикатрисы ретроотражения оптико-электронных приборов известными функциями аппроксимации, учитывающая особенности, характерные для инфракрасного диапазона спектра. Проведен сравнительный анализ различных аппроксимирующих функций. Предложен метод расчета аналитических зависимостей показателя световозвращения, основанный на использовании основных паспортных данных инфракрасного прибора

Ключевые слова

Световозвращательные характеристики, индикатриса ретроотражения, показатель световозвращения, инфракрасные приборы

Поступила 18.06.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. Развитие лазерной локационной аппаратуры, предназначенной для дистанционного мониторинга удаленных оптико-электронных систем (ОЭС), связано с применением математического моделирования, целью которого является теоретическое исследование обнаружительных характеристик аппаратуры. Принцип ее действия основан на использовании эффекта световозвращения [1].

Основные исходные данные для расчета лазерной локационной аппаратуры обнаружения — световозвращательные характеристики ОЭС: индикатриса ретроотражения; показатель световозвращения; пеленгационная характеристика [1].

Сведения о перечисленных характеристиках ОЭС могут быть получены экспериментально, путем их измерения с помощью методик, описанных в работах [2–5]. Для получения экспериментальных данных требуется наличие соответствующих образцов ОЭС.

В то же время для теоретического исследования процесса световозвращения важную роль играет аналитическое описание световозвращательных характеристик ОЭС. Именно с использованием их аналитиче-

ского описания можно реализовать методики расчета обнаружительных характеристик локационной аппаратуры [6–10]. В связи с этим задача по разработке методики для теоретического моделирования и расчета световозвращательных характеристик ОЭС является весьма актуальной.

Результаты анализа зависимости показателя световозвращения от угла усреднения. Основной параметр для сравнительной оценки различных ОЭС с позиции возможности их обнаружения — показатель световозвращения $R(\Omega_y)$ (ПСВ). Интегральный ПСВ прибора, усредненный в некотором телесном угле Ω_y , рассчитывается по формуле [1]:

$$R(\Omega_y) = \frac{1}{E\Omega_y} \iint_{\Omega_y} I(\Omega_y) d\Omega, \quad (1)$$

где E — освещенность в плоскости входного зрачка световозвращателя; $I(\Omega_y)$ — индикатриса ретроотражения как функция телесного угла усреднения.

В формуле (1) выразим освещенность в плоскости входного зрачка E и индикатрису ретроотражения $I(\Omega_y)$ через падающий и ретроотраженный потоки излучения (рис. 1). Учтем, что падающий и ретроотраженный потоки связаны между собой через интегральные коэффициенты пропускания оптической системы (ОС) световозвращателя и коэффициент отражения чувствительного слоя фотоприемного устройства (ФПУ). После математических преобразований получим

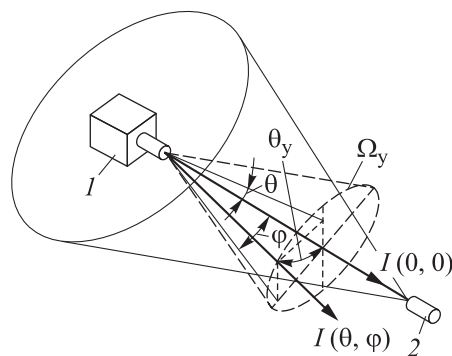


Рис. 1. Схема для определения ПСВ $R(\Omega_y)$:

1 — световозвращатель; 2 — лазерная локационная система

$$R(\Omega_y) = \frac{\pi \tau_{OC}^2 \tau_{OC}^2_{ФПУ} \rho_{ФПУ} D_{СВЗ}^2}{4\Omega_y}. \quad (2)$$

Здесь τ_{OC} — интегральный коэффициент пропускания ОС световозвращателя; $\tau_{OC\ ФПУ}$ — интегральный коэффициент пропускания ОС ФПУ световозвращателя; $\rho_{ФПУ}$ — коэффициент отражения чувствительного слоя ФПУ световозвращателя; $D_{СВЗ}$ — диаметр входного зрачка ОС световозвращателя.

Телесный угол усреднения в приближении малых углов связан с соответствующим плоским углом усреднения θ_y соотношением:

$$\Omega_y = \pi\theta_y^2. \quad (3)$$

Тогда (2) с учетом (3) можно представить в виде

$$R(\theta_y) = \frac{\tau_{OC}^2 \tau_{OC}^2 \rho_{ФПУ} D_{свз}^2}{4\theta_y^2}. \quad (4)$$

Входящая в (4) величина θ_y является характеристикой угловой расходимости ретроотраженного от световозвращателя излучения. В предельном случае оптическую систему световозвращателя допустимо полагать дифракционно ограниченной. При этом максимальное значение угловой расходимости ретроотраженного излучения будет описываться выражением

$$\theta_{y \max} = \frac{1,22\lambda}{D_{свз}}, \quad (5)$$

где λ — рабочая длина волны.

Подставляя (5) в (4), получаем

$$R = R(\theta_{y \max}) = \frac{\tau_{OC}^2 \tau_{OC}^2 \rho_{ФПУ} D_{свз}^4}{6\lambda^2}. \quad (6)$$

Выражение (6) можно использовать в том случае, когда угловой размер входного зрачка приемного канала лазерной локационной системы (ЛЛС) (с учетом расстояния до лоцируемого световозвращателя) $\theta_{ЛЛС}$ согласован с максимальным углом расходимости ретроотраженного излучения $\theta_{y \max}$: $\theta_{ЛЛС} \geq \theta_{y \max}$. В противном случае не все ретроотраженное излучение попадает в приемный канал ЛЛС. Оценим выполнение данного условия для видимого и ИК-диапазонов спектра. Для этого используем формулу (5) и вычислим максимальные углы расходимости ретроотраженного излучения для дифракционных ОС с диаметром входного зрачка $D_{свз} = 100$ мм, работающих в видимом ($\lambda_{в} = 0,5$ мкм), средневолновом ($\lambda_{ср} = 4$ мкм) и длинноволновом ($\lambda_{дл} = 10,6$ мкм) ИК-диапазонах: $\theta_{y \max в} \approx 1,25''$; $\theta_{y \max ср} \approx 10''$; $\theta_{y \max дл} \approx 25''$.

Оценим характерные значения угловых размеров входных зрачков приемного канала ЛЛС:

$$\theta_{ЛЛС} = \frac{D_{ЛЛС}}{2L}, \quad (7)$$

где $D_{ЛЛС}$ — диаметр входного зрачка приемного канала ЛЛС; L — дальность от ЛЛС до световозвращателя. По формуле (7) для $D_{ЛЛС} = 100$ мм и $L = 2$ км получим $\theta_{ЛЛС} \approx 5''$.

Согласно результатам анализа, для систем, работающих в видимом диапазоне спектра, угловые размеры индикатрис ретроотражения в большинстве случаев меньше углового размера входного зрачка ЛЛС: $\theta_{y \max в} < \theta_{\text{ЛЛС}}$. Следовательно, в таком случае угол усреднения θ_y , при котором рассчитывается значение ПСВ, целесообразно приравнять к угловому размеру индикатрисы ретроотражения $\theta_y = \theta_{y \max в}$ и для вычисления значения ПСВ использовать формулу (6). Однако для оптических систем ИК-диапазона угловые размеры индикатрис ретроотражения больше, чем угловой размер входного зрачка ЛЛС: $\theta_{y \max ср}, \theta_{y \max дл} > \theta_{\text{ЛЛС}}$. Тогда при светоэнергетическом расчете необходимо знать значение ПСВ для $\theta_{\text{ЛЛС}}$.

Существует точная методика расчета зависимости ПСВ от угла усреднения, основанная на использовании конструктивных параметров ОС световозвращателя. Согласно этой методике, с помощью САПР *Zemax* формируется схема ОС (рис. 2), состоящая из оптической системы объектива, задняя фокальная плоскость которого совмещена с передней фокальной плоскостью данного объектива в обратном ходе лучей. Пространственное распределение индикатрисы ретроотражения будет наблюдаться в плоскости, бес-

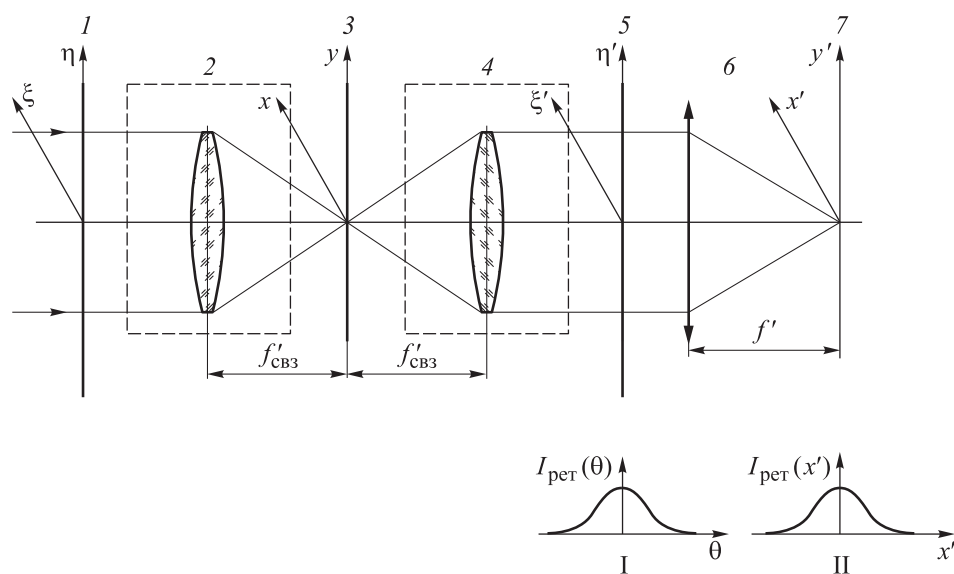


Рис. 2. Схема хода лучей в ОС, работающей как световозвращатель:

I — индикатриса ретроотражения; II — распределение интенсивности, соответствующее индикатрисе ретроотражения световозвращателя; 1, 5 — плоскости входного и выходного зрачков световозвращателя; 2 — объектив световозвращателя; 3 — плоскость установки фокального элемента; 4 — обращенный объектив световозвращателя; 6 — безабберационный объектив; 7 — плоскость анализа индикатрисы ретроотражения

конечно удаленной от выходного зрачка полученной ОС. Для удобства в указанной методике используется безабберационный параксиальный компонент, который переносит плоскость анализа из бесконечности в свою фокальную плоскость. При этом угловые координаты индикатрисы ретроотражения с учетом фокусного расстояния безабберационного компонента можно рассчитать по формуле

$$\theta = \frac{x'}{f'}$$

Таким образом, для вычисления численной зависимости ПСВ от некоторого угла усреднения с применением указанной выше точной методики требуется знать конструктивные параметры световозвращателя. В настоящее время эта методика дает наиболее точные результаты расчета отражательных характеристик, поэтому они могут быть приняты как эталонные.

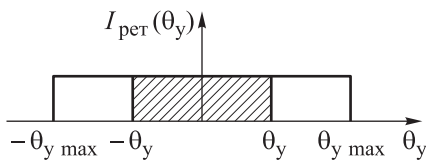


Рис. 3. График сечения индикатрисы ретроотражения в виде цилиндрической функции

Сравнительный анализ основных типов функций для моделирования индикатрисы ретроотражения. Рассмотрим описание индикатрисы ретроотражения известными функциями аппроксимации — цилиндрической или гауссовой. Аппроксимируем индикатрису ретроотраженного излучения цилиндрической

функцией (рис. 3) и рассчитаем соответствующее значение ПСВ:

$$I_{\text{рет}}(\theta_y) = \text{circ}\left(\frac{\theta_y}{\theta_{y \max}}\right), \tag{8}$$

где $\theta_{y \max}$ — угловой размер индикатрисы ретроотражения, определяемый по (5).

Найдем зависимость ПСВ от угла усреднения $R(\theta_y)$. Из (1) с учетом (8) получим

$$\begin{aligned} \frac{R_{\text{circ}}(\theta_y)}{R(\theta_{y \max})} &= \frac{\frac{1}{E\Omega_y} \iint_{\Omega_y} \text{circ}\left(\frac{\theta_y}{\theta_{y \max}}\right) d\Omega}{\frac{1}{E\Omega_{y \max}} \iint_{\Omega_{y \max}} \text{circ}\left(\frac{\theta_y}{\theta_{y \max}}\right) d\Omega} = 1, \\ R_{\text{circ}}(\theta_y) &= R(\theta_{y \max}). \end{aligned} \tag{9}$$

Согласно результатам анализа выражения (9), при выборе индикатрисы ретроотражения в виде цилиндрической функции интегральный ПСВ не зависит от угла усреднения, а его значение может быть определено по формуле (6). Данная аппроксимация дает грубый результат при расчете значения ПСВ, однако простота вычислений в этом случае является преимуществом использования цилиндрической функции при моделировании в инженерной практике.

Оценим погрешности, которые возникают при аппроксимации зависимости индикатрисы ретроотражения. Для вычисления погрешности используем общее выражение для расчета относительной погрешности:

$$\delta R(\theta_y) = \frac{|R_T(\theta_y) - R_{\text{ап}}(\theta_y)|}{R_T(\theta_y)}. \quad (10)$$

Здесь $R_T(\theta_y)$ — точная зависимость ПСВ от угла усреднения; $R_{\text{ап}}(\theta_y)$ — зависимость ПСВ от угла усреднения при аппроксимации функции рассеяния.

Для оценки погрешности аппроксимации цилиндрической функцией выберем три дифракционно ограниченные ОС, работающие в видимом ($\lambda_{\text{в}} = 0,5$ мкм), средневолновом ($\lambda_{\text{ср}} = 4$ мкм) и длинноволновом ($\lambda_{\text{дл}} = 10,6$ мкм) ИК-диапазонах. Нормированные индикатрисы ретроотражения для таких систем показаны на рис. 4, а. Рассчитаем зависимость ПСВ от угла усреднения $R_{\text{диф}}(\theta_y)$ для каждой анализируемой дифракционно ограниченной ОС по (1). Зависимость ПСВ от угла усреднения $R_{\text{сирс}}(\theta_y)$ в случае, когда индикатриса ретроотражения аппроксимируется цилиндрической функцией, определим по (9).

В таком случае формулу (10) можно записать в виде

$$\delta R(\theta_y) = \frac{|R_{\text{диф}}(\theta_y) - R_{\text{сирс}}(\theta_y)|}{R_{\text{диф}}(\theta_y)}. \quad (11)$$

Зависимость относительной погрешности, определенной по (11), от углового размера θ_y приведена на рис. 4, б.

Согласно результатам анализа зависимости относительной погрешности от углового размера, для описания процесса световозвращения в ОЭС, работающих в видимом диапазоне спектра, нельзя применять аппроксимацию индикатрисы ретроотражения цилиндрической функцией, поскольку при углах усреднения больше $1...2''$ погрешность расчета ПСВ резко возрастает. Для ОС ИК-диапазона описание индикатрисы ретроотра-

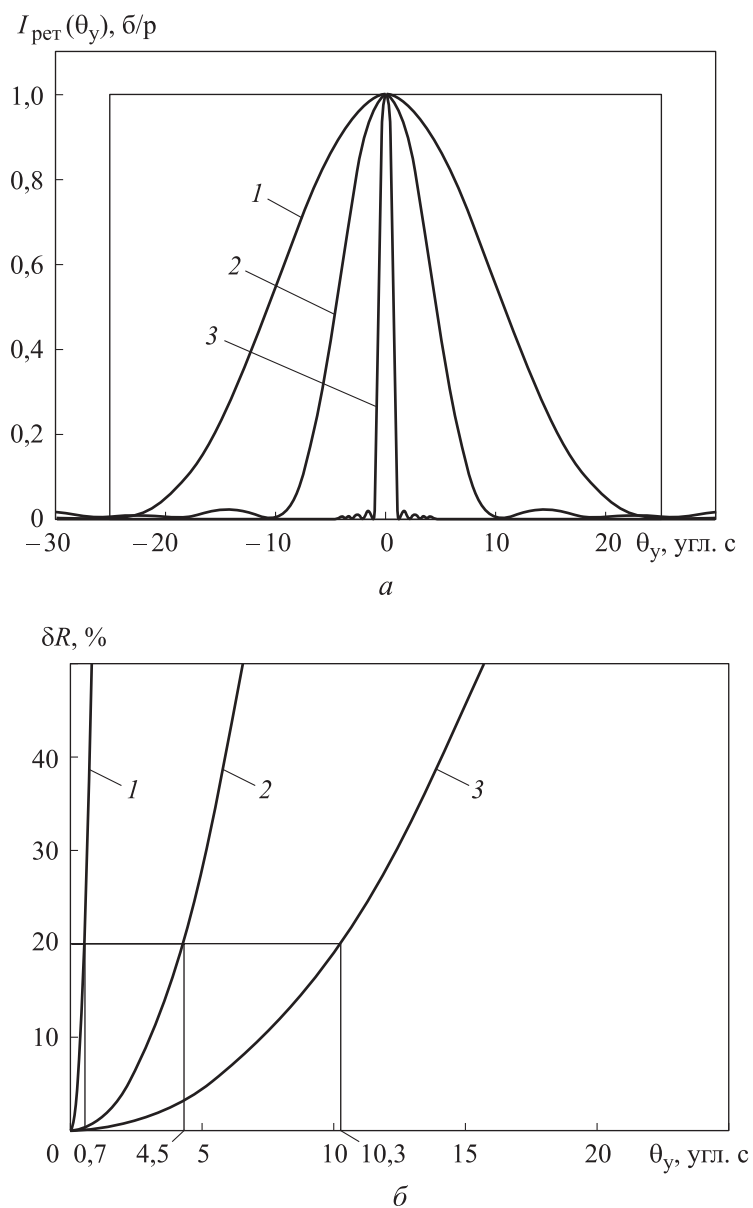


Рис. 4. Нормированные индикатрисы ретроотражения (а) и зависимость относительной погрешности от угла усреднения (б) для ОС, работающих в видимом (1), средневолновом (2) и длинноволновом (3) ИК-диапазонах

жения с помощью цилиндрической функции позволяет получить значения допустимых погрешностей определения ПСВ, не превышающие 20 % для типовых угловых размеров входного зрачка $\theta_{\text{ЛЛС}}$ приемного канала ЛЛС.

Аппроксимируем индикатрису ретроотражения излучения гауссoidal вращения (рис. 5):

$$I_{\text{рет}}(\theta_y) = \exp\left(-\frac{\theta_y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (12)$$

Угловой размер аппроксимирующей функции целесообразно назначать равным ширине индикатрисы ретроотражения по уровню 0,1. Если информация о конструктивных параметрах ОС световозвращателя известна, то угловой размер аппроксимирующей гауссоиды можно найти путем моделирования ОС световозвращателя в САПР *Zemax*.

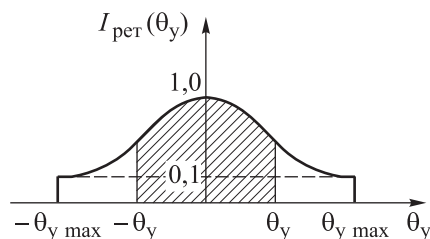


Рис. 5. График сечения индикатрисы ретроотражения в виде гауссоиды вращения

При отсутствии информации о конструктивных параметрах ОС световозвращателя угловой размер индикатрисы ретроотражения может быть рассчитан как угол расходимости ретроотраженного излучения для дифракционной ОС по формуле (5). Такое допущение правомерно, поскольку большинство типовых ИК-объективов имеет качество, близкое к дифракционному пределу.

Величину σ , которая характеризует угловой размер аппроксимирующей гауссоиды в формуле (12), вычислим через угловой размер индикатрисы ретроотражения ОС световозвращателя $\theta_{y \max}$ так, чтобы для максимального угла усреднения значение индикатрисы составляло 0,1: $I_{\text{рет}}(\theta_{y \max}) = 0,1$.

Зависимость величины σ от углового размера индикатрисы $\theta_{y \max}$ имеет вид

$$\sigma = \sqrt{-\frac{\theta_{y \max}^2}{2 \ln 0,1}}. \quad (13)$$

В результате

$$I_{\text{рет}}(\theta_y) = \exp\left(\frac{\theta_y^2 \ln 0,1}{\theta_{y \max}^2}\right). \quad (14)$$

Найдем зависимость ПСВ от угла усреднения $R(\theta_y)$. Из выражения (1) с учетом выражения (14) получим

$$\frac{R_{\text{гаусс}}(\theta_y)}{R(\theta_{y \max})} = \frac{\frac{1}{E\Omega_y} \iint_{\Omega_y} \exp\left(\frac{\theta_y^2 \ln 0,1}{\theta_{y \max}^2}\right) d\Omega}{\frac{1}{E\Omega_{y \max}} \iint_{\Omega_{y \max}} \exp\left(\frac{\theta_y^2 \ln 0,1}{\theta_{y \max}^2}\right) d\Omega}. \quad (15)$$

Перейдем от интегрирования по телесному углу к интегрированию по соответствующим плоским углам:

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (16)$$

где θ — угол места сферической системы координат; φ — азимутальный угол сферической системы координат.

С учетом малости плоских углов перейдем от тригонометрических функций к значениям углов, выраженным в радианах:

$$\sin \theta \approx \theta. \quad (17)$$

В результате из выражения (15) с учетом (3), (16) и (17) получим

$$R_{\text{гаусс}}(\theta_y) = \frac{\theta_{y \max}^2}{\theta_y^2} \frac{\left(1 - \exp\left(\frac{\theta_y^2 \ln 0,1}{\theta_{y \max}^2}\right)\right)}{0,9} R(\theta_{y \max}). \quad (18)$$

В формуле (18) $R(\theta_{y \max})$ рассчитывается по (4) с учетом углового размера индикатрисы $\theta_{y \max}$.

Оценим погрешности, которые возникают при аппроксимации гауссоидой вращения индикатрис ретроотражения дифракционно ограниченных ОС. По формуле (1) рассчитаем зависимость ПСВ от угла усреднения $R(\theta_y)$ для указанных выше дифракционно ограниченных ОС, работающих в видимом, средневолновом и длинноволновом ИК-диапазонах (рис. 6, а). Зависимость ПСВ от угла усреднения $R(\theta_y)$ в случае, когда индикатриса ретроотражения аппроксимируется гауссоидой вращения, определим по (18). Тогда формулу (10) для расчета относительной погрешности можно записать в виде

$$\delta R(\theta_y) = \frac{|R_{\text{диф}}(\theta_y) - R_{\text{гаусс}}(\theta_y)|}{R_{\text{диф}}(\theta_y)}. \quad (19)$$

Зависимость относительной погрешности, рассчитанной по (19), от углового размера приведена на рис. 6, б.

Согласно результатам анализа графика относительной погрешности, в рассматриваемом случае значение погрешности не превышает единиц процентов во всем диапазоне углов усреднения. Поэтому моделирование индикатрисы отражения гауссоидой вращения может использоваться для дифракционно ограниченных ОС.

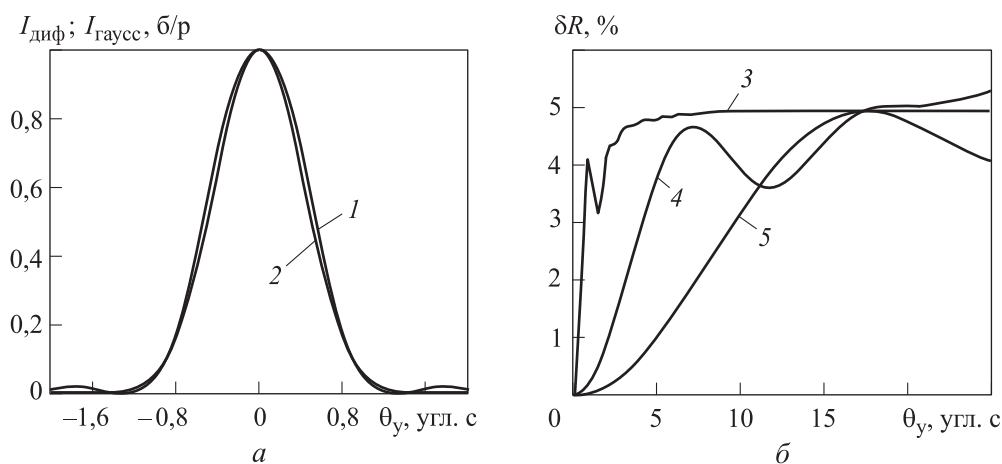


Рис. 6. Индикатриса ретроотражения дифракционно ограниченной ОС (1) и аппроксимирующей гауссоиды вращения (2) (а), зависимость относительной погрешности определения зависимости ПСВ от угла усреднения при аппроксимации индикатрисы ретроотражения гауссоидой вращения (б) для ОС, работающих в видимом (3), средневолновом (4) и длинноволновом (5) ИК-диапазонах

Определим погрешность при расчете зависимости ПСВ от угла усреднения для реальных ОС. Для этого сравним результаты расчета зависимости ПСВ от угла усреднения по аналитической формуле (18) с результатами, полученными с помощью точной методики расчета, основанной на использовании конструктивных параметров оптической системы световозвращателя.

В качестве исходных данных для расчета рассмотрим несколько типовых ОС, работающих в ИК-диапазоне спектра. Простейшей ОС является зеркально-линзовый световозвращатель, состоящий из двухлинзового объектива и плоского зеркала, размещенного в задней фокальной плоскости объектива. С помощью САПР *Zemax* проведем расчет ОС данного световозвращателя для определения углового размера индикатрисы ретроотражения $\theta_{y \text{ max}}$. Затем по формуле (13) определим величину σ , которая характеризует уг-

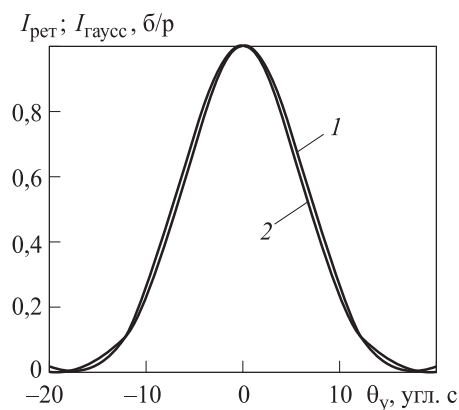


Рис. 7. Индикатриса ретроотражения (1) и аппроксимирующая гауссоида вращения (2) для двухлинзового объектива

ловой размер аппроксимирующей гауссоиды. Аппроксимирующая гауссоида и индикатриса ретроотражения, полученная с помощью САПР *Zemax*, показаны на рис. 7.

По полученным данным определим зависимость ПСВ от угла усреднения $R(\theta_y)$. В первом случае проведем расчет по точной методике, основанной на использовании конструктивных параметров ОС световозвращателя. Во втором подставим полученные параметры аппроксимирующей гауссоиды в формулу (18). Нормированные зависимости ПСВ от угла усреднения $R(\theta_y)$ приведены на рис. 8, а.

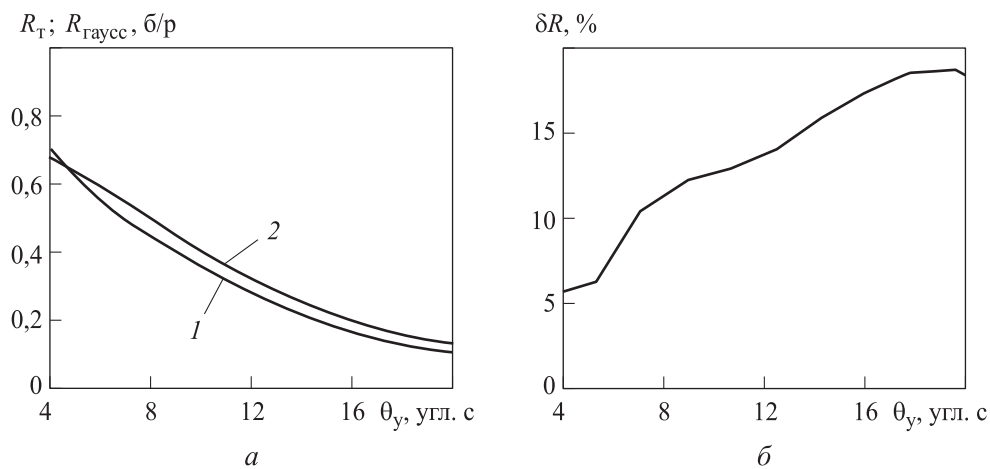


Рис. 8. Зависимость ПСВ от угла усреднения (1), рассчитанная по точной методике, основанной на использовании конструктивных параметров ОС световозвращателя, и аналитическая зависимость ПСВ от угла усреднения (2) (а), зависимость относительной погрешности определения зависимости ПСВ от угла усреднения (б)

В качестве критерия применимости предложенной аппроксимации используем относительную погрешность определения ПСВ для всех возможных значений угла усреднения. В таком случае формула (10) для расчета относительной погрешности вычислений имеет вид

$$\delta R(\theta_y) = \frac{|R_T(\theta_y) - R_{\text{гаусс}}(\theta_y)|}{R_T(\theta_y)}. \quad (20)$$

Зависимость относительной погрешности от угла усреднения приведена на рис. 8, б.

Рассмотрим трехлинзовый объектив, построенный по схеме «триплет». По аналогии вычислим погрешности определения зависимости ПСВ

от угла усреднения для данного световозвращателя. Аппроксимирующая гауссоида и индикатриса ретроотражения, полученная с использованием САПР *Zemax*, для трехлинзового объектива показаны на рис. 9.

Нормированные зависимости ПСВ $R(\theta_y)$ от угла усреднения приведены на рис. 10, а, зависимость относительной погрешности, рассчитанной по (20), от угла усреднения — на рис. 10, б.

В соответствии с результатами анализа полученных зависимостей (см. рис. 8, 10) относительная погрешность определения ПСВ с помощью аппроксимации индикатрисы ретроотражения гауссоидой вращения по абсолютному значению не превышает 20 % для типовых ОС, работающих в ИК-диапазоне спектра.

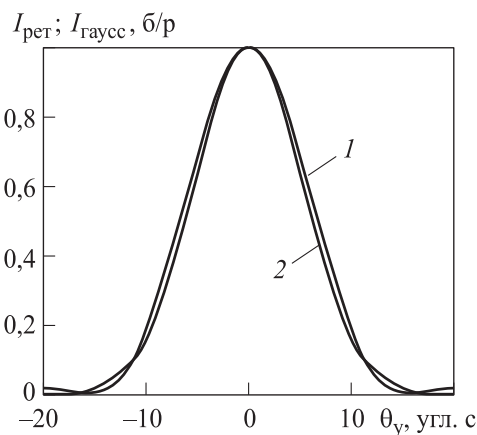


Рис. 9. Индикатриса ретроотражения (1) и аппроксимирующая гауссоида (2) для трехлинзового объектива

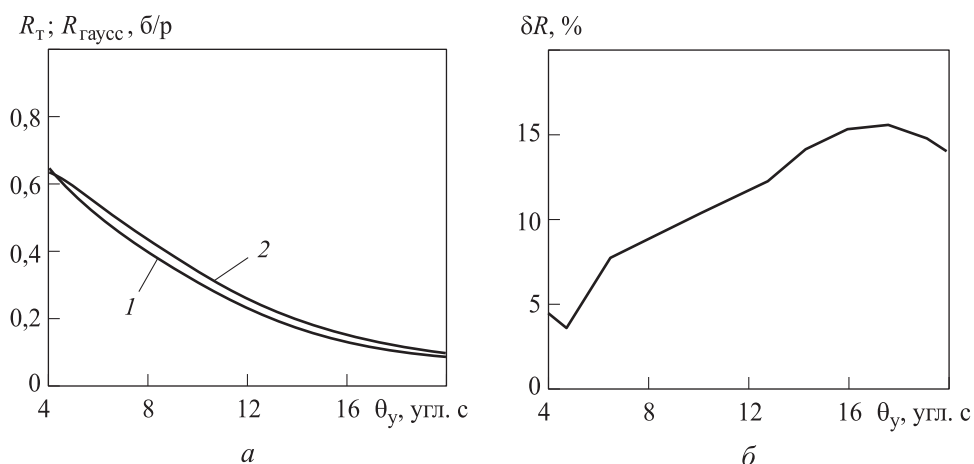


Рис. 10. Зависимость ПСВ от угла усреднения (1), рассчитанная по точной методике, основанной на использовании конструктивных параметров ОС световозвращателя, и аналитическая зависимость ПСВ от угла усреднения (2) (а), зависимость относительной погрешности определения зависимости ПСВ от угла усреднения (б)

Заключение. Разработана методика расчета световозвращательных характеристик, в частности, предложены подходы к модельному описанию индикатрисы ретроотражения ОЭС, учитывающие особенности, характер-

ные для средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов спектра. Проведен сравнительный анализ различных типов функций для аппроксимации индикатрисы ретроотражения и обосновано использование в качестве аппроксимирующей функции гауссоиды вращения. Предложена методика расчета, позволяющая получать аналитические зависимости ПСВ от угла усреднения. В отличие от известных методик такая методика не требует информации о конструктивных параметрах оптической системы световозвращателя и позволяет проводить расчеты на основе основных паспортных данных исследуемого ИК-световозвращателя. Указанная особенность дает возможность упростить процесс исследования световозвращательных характеристик и хорошо согласуется с экспериментальными данными, что позволяет применять эту методику в инженерной практике. Предложенная методика может быть использована как для разработки ЛЛС, работающих в ИК-диапазоне, так и для разработки тепловизионных систем, обеспечивающих повышенную скрытность работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
- [2] Барышников Н.В., Степанов Р.О. Разработка метода и аппаратуры измерения световозвращательных характеристик ОЭС ИК-диапазона. *Измерительная техника*, 2007, № 9, с. 24–28.
- [3] Карасик В.Е., Вун Е Тэ, Животовский И.В. Оптико-электронный стенд для измерения сверхмалых показателей световозвращения оптических систем камер скрытого видеонаблюдения. *Динамика сложных систем — XXI век*, 2014, № 2, с. 100–106.
- [4] Вун Е Тэ, Животовский И.В. Методика экспериментального исследования световозвращательных характеристик оптических систем камер скрытого видеонаблюдения. М., ФГУП «МКБ Электрон», 2013.
- [5] Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Животовский И.В. Автоматизация измерений световозвращательных характеристик. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2004, № 2, с. 27–35.
- [6] Барышников Н.В., Карасик В.Е., Степанов Р.О. Исследование отражательных характеристик тетраэдрических световозвращателей в ИК-диапазоне. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 1, с. 3–16.
- [7] 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.

[8] 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, т. 19, № 6, с. 54–59.

[9] 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, с. 25–35.

[10] 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: 10.18698/2308-6033-2012-9-360

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 «Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Лебедев Василий Андреевич — младший научный сотрудник 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. Разработка модели для описания индикатрисы ретроотражения оптико-электронных приборов инфракрасного диапазона. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 1, с. 4–19. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-1-4-19

DEVELOPING A MODEL TO DESCRIBE THE RETROREFLECTION PHASE FUNCTION IN INFRARED OPTOELECTRONIC DEVICES

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 paper presents a technique for modelling the retroreflection phase function in infrared optoelectronic devices by employing known fitting functions. The model takes into account

Keywords

Retroreflection properties, retroreflection phase function, retroreflection index, infrared equipment

the specifics of operating in the infrared range of the electromagnetic spectrum. We performed a comparative analysis of various fitting functions. We propose a method for computing retroreflection index as analytic functions, which uses the main infrared equipment specification data

Received 18.06.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Karasik V.E., Orlov V.M. Lokatsionnye lazernye sistemy videniya [Location laser vision systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2013.
- [2] Baryshnikov N.V., Stepanov R.O. Development of a method and apparatus for measuring the light-reflecting characteristics of infrared optoelectronic systems. *Meas. Tech.*, 2007, vol. 50, iss. 9, pp. 949–955. DOI: 10.1007/s11018-007-0178-0
- [3] Karasik V.E., Vun E Te, Zhivotovskiy I.V. Electrooptical stage for measuring the retro-reflection radiation characteristics of optical systems concerning with miniature CCTV camera. *Dinamika slozhnykh sistem — XXI vek* [Journal Dynamics of Complex Systems — XXI Century], 2014, no. 2, pp. 100–106 (in Russ.).
- [4] Vun E Te, Zhivotovskiy I.V. Metodika eksperimental'nogo issledovaniya svetovozvrazhchatel'nykh kharakteristik opticheskikh sistem kamer skrytogo videonablyudeniya [Experimental research methodology for study on light-retroreflection characteristics of CCTV optical systems]. Moscow, FGUP "MKB Elektron" Publ., 2013.
- [5] Baryshnikov N.V., Bokshanskiy V.B., Zhivotovskiy I.V. Automation of measurement of light-retroreflection characteristics. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2004, no. 2, pp. 27–35 (in Russ.).
- [6] Baryshnikov N.V., Karasik V.E., Stepanov R.O. Investigation of reflective characteristics of tetrahedral cat's eyes in IR-range. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2010, no. 1, pp. 3–16 (in Russ.).
- [7] 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* [Journal Information-Measuring and Control Systems], 2005, no. 4-5, pp. 76–86 (in Russ.).
- [8] Karasik V.E., Vun E Te. Analysis possibility to increase noise immunity laser location systems using retro-reflection radiation effect on the detection of hidden surveillance cameras. *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2014, vol. 19, no. 6, pp. 54–59 (in Russ.).
- [9] Bokshanskiy V.B., Karasik V.E., Taranov M.A. Automatic detection of retroreflectors using laser location systems. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.*

[Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2011, no. 2, pp. 25–35 (in Russ.).

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

Baryshnikov N.V. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Laser and Optoelectronic System, 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. — Junior Research Scientist, Department of Laser and Optoelectronic System, 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. 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, pp. 4–19 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2019-1-4-19