Метод оценивания внутреннего паразитного излучения оптических трактов инфракрасных систем

А. В. Макаренко[1], А. В. Правдивцев, А. Н. Юдин

Федеральное космическое агентство РФ
ФНПЦ ФГУП «НИИ прецизионного приборостроения»
111250, Москва, Авиамоторная, 53

Описан метод, позволяющий моделировать фоновые засветки в оптических трактах тепло-пеленгационных систем инфракрасного диапазона 3-5 и 8-14 мкм. Подход базируется на САПР Zemax и учитывает излучение и многократные переотражения от линз, оправ и иных конструктивных элементов оптических трактов. Модель оперирует реальными материалами и покрытиями, и позволяет получать абсолютные значения паразитного потока попадающего на приёмник. Кроме того, имеется возможность оценивать пространственное распределение потока по поверхности приёмника, а также анализировать вклад каждого из элементов оптического тракта в суммарный паразитный поток.

Ключевые слова: оптические тракты, паразитное излучение, оценивание.

1. Введение

Современные тепло-пеленгационные системы, предназначенные для обнаружения объектов, как правило, работают в среднем (3-5 мкм) и/или дальнем (8-14 мкм) ИК-диапазонах. В случае применения в составе этих систем фотонных приёмников, они охлаждаются до криогенных температур (типичные значения 30-80 K). Это позволяет достичь режима BLIP (Background Limited Infrared Photodetector – ограничение чувствительности приёмника флуктуациями фона), когда пороговый поток эквивалентный шуму приёмника лимитируется флуктуациями фонового излучения,определённую долю в котором занимает паразитное излучение оптического тракта тепло-пеленгационной системы.

В [1] и [2] предлагается определять поток от элементов оптической системы, путём представления их серым телом, расположенным перед приёмником излучения. Подход оперирует коэффициентами пропускания линз и излучательной способностью источника. Но в нём не учитываются многократные переотражения на линзах и деталях оправы потока, порождаемого линзами, и не принимаются во внимание излучения оправ и иных конструктивных элементов оптического тракта. При этом на практике вполне

[1]E-mail: avm.science@mail.ru

возможна ситуация, когда излучение от оправ и конструктивных элементов тракта вносит настолько значимый вклад в паразитный поток на приёмнике, что пренебрегать им нельзя. Как указано в [2], часто внутренние засветки оцениваются на уже изготовленном устройстве, и приходится прилагать значительные усилия и применять искусственные меры по их устранению, что снижает потенциально достижимое качество функционирования проектируемых систем. Кроме того, для тепло-пеленгационных систем, соотношение сигнал/фон является одним из ведущих критериев характеризующих их функциональное качество. Поэтому оценивать внутренние излучения оптических трактов подобных систем необходимо ещё на этапе проработки их схемных решений, когда прямые измерения недоступны, а аналоги разрабатываемых систем – отсутствуют.

В настоящей работе описывается подход свободный от вышеприведённых недостатков и ограничений. В среде САПР Zemax разработана универсальная математическая модель настраивающаяся на конкретную конструктивную схему и параметры анализируемого оптического тракта (возможен прямой импорт схем из широко распространённых конструкторских САПР). Модель учитывает излучение и многократные переотражения от линз, оправ и иных конструктивных элементов оптического тракта, оперирует реальными материалами и покрытиями. Разработанная методика анализа фоновых засветок позволяет получать абсолютные значения паразитного потока попадающего на приёмник, оценивать пространственное распределение потока по поверхности приёмника, а также анализировать вклад каждого из элементов тракта в суммарный паразитный поток. Всё это в целом позволяет адекватно моделировать паразитные засветки в оптических трактах оптико-электронных систем инфракрасного диапазона 3-5 и 8-14 мкм.

2. Постановка задачи

Современные программы расчёта оптических систем, в том числе и Zemax, позволяют, путём прямого расчёта хода лучей, определять интегральный поток излучения попадающий от источника на приёмник, с учётом свойств среды распространения. Как указано в [3], вычисление освещённости в плоскости изображения оптической системы, посредством трассировки реального хода луча, является самым точным, так как учитывает аберрации оптической системы.

Модель паразитных засветок в оптических трактах оптико-электронных систем инфракрасного диапазона 3-5 и 8-14 мкм должна оперировать

следующими объектами:

- источники паразитного излучения;
- среда распространения излучения;
- приёмники излучения.

В качестве источников паразитного излучения задаются:

- оптические элементы (линзы, зеркала, киноформные элементы);
- элементы оправ оптических элементов;
- иные конструктивные элементы оптического тракта;
- источники паразитного излучения.

Ведущими характеристиками источников и условий распространения излучения являются:

- конкретная конструктивная схема анализируемого оптического тракта;
- температура оптического тракта (в общем случае – пространственное распределение температуры);
- коэффициенты поглощения/отражения/рассеивания материалов оптических элементов, элементов оправ, иных конструктивных элементов оптического тракта;
- энергетическая яркость источников паразитного излучения.

Конфигурация приёмников излучения определяется набором параметров:

- формат приёмника – количество элементов по столбцу и строке;
- шаг решётки сенсоров;
- размер элемента сенсора;
- форма фоточувствительной площадки сенсора;
- размер фоточувствительной площадки сенсора;
- коэффициент отражения от поверхности приёмника.

Модель должна формировать корректные оценки:

- абсолютных (выраженных в Вт/м^2) значений паразитного потока попадающего на приёмник;
- пространственного распределения потока по поверхности приёмника;
- относительного вклада каждого из элементов оптического тракта в суммарный паразитный поток.

Для модели задаётся область функционирования: инфракрасный диапазон 3-5 и 8-14 мкм, и потенциально 20-70 мкм.

3. Исследование адекватности предлагаемого метода прямого расчёта хода лучей

3.1. Оценивание интегрального потока

Разработку методики расчёта интегральной интенсивности внутренних излучений оптического тракта логично начать с проверки корректности применяемого метода прямого расчёта хода лучей (ПРХЛ). Для этого сравним результаты аналитического расчёта с результатами расчётов выполненных в САПР Zemax для следующего модельного примера.

Перед приёмником, который располагается внутри холодильника, поместим источник – абсолютно чёрное тело (АЧТ) с плоской поверхностью излучающей по закону Ламберта. Будем считать, что приёмник экранирован от всех других источников излучения, кроме АЧТ. В качестве приёмника излучения примем одноплощадочный приёмник квадратной формы, со стороной $a_{px} = 30$ мкм расположенный от охлаждаемой диафрагмы на расстоянии $h_{AD} = 19$ мм, диаметр диафрагмы $D_{AD} = 10.6$ мм. При этом излучающая поверхность источника вплотную прилегает к диафрагме и их плоскости параллельны плоскости приёмника, а центры всех элементов лежат на одной оси. Примем, что температура АЧТ равна $T_{BB} = 300.80$ К, внутренние стенки холодильника – полностью поглощающие. Для анализа зададим спектральный диапазон: от $\lambda_1 = 3$ мкм, до $\lambda_2 = 5$ мкм.

Энергетическую светимость источника излучения оценим по формуле Планка [4]:

$$M_{BB} = \int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_{1R}}{\lambda^5\, e^{C_{2R}\,\lambda^{-1}\,T_{BB}^{-1}} - 1}\,\mathrm{d}\lambda, \tag{3.1}$$

где: h – постоянная Планка; c – скорость света; k – постоянная Больцмана; C_{1R} и C_{2R} – соответственно первая и вторая радиационные постоянные.

Энергетическую яркость источника определим по формуле (источник плоский, излучает по закону Ламберта):

$$L_{BB} = \frac{M_{BB}}{\pi}. \tag{3.2}$$

Поток от источника в полусферу, ориентированную на приёмник, рассчитаем по формуле:

$$\Phi_{BB} = M_{BB}\frac{\pi\, D_{AD}^2}{4}. \tag{3.3}$$

Для аналитического расчёта величины Φ_R^{BB} – интегрального потока излучаемого источником и попадающего на приёмник, рассмотрим формализованную математическую модель анализируемой системы, которая схематично изображена на рисунке 1. Из вышеприведённого описания си-

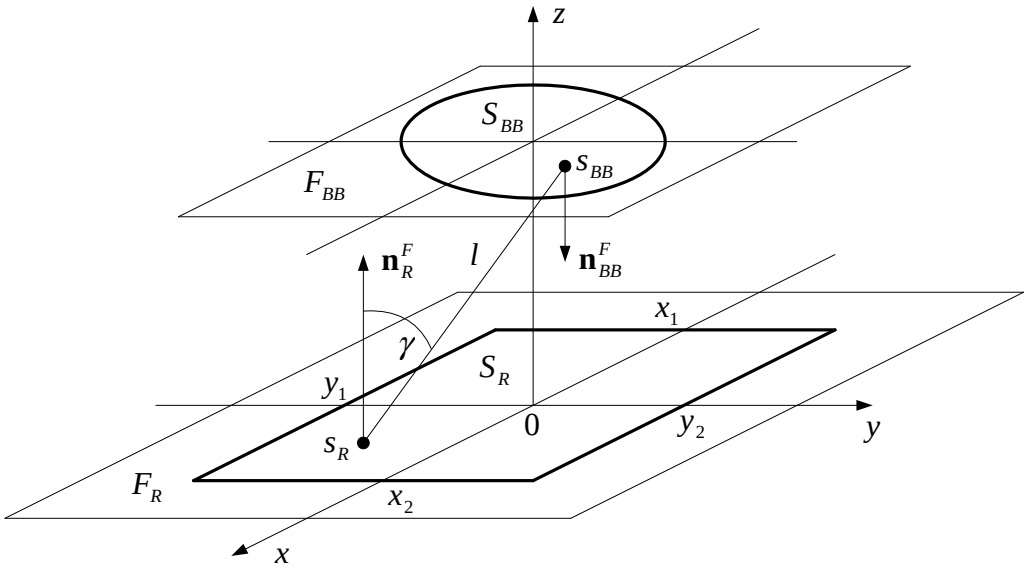

Рис. 1. Схема анализируемой системы «источник-приёмник».

стемы следует, что источник и приёмник являются плоскими, при этом их плоскости параллельны, $\mathbf{n}_{BB}^F \parallel \mathbf{n}_R^F$. Источник ограничен круговой областью S_{BB}, а приёмник – прямоугольной областью S_R. Следовательно, поток, излучаемый источником и приходящий на приёмник, вычисляется через два двойных интеграла [5], первый из которых берётся по области, S_{BB}, а второй по области S_R:

$$\Phi_R^{BB} = L_{BB} \iint\limits_{(S_R)} \iint\limits_{(S_{BB})} \frac{\cos^2\gamma\,(s_{BB},\, s_R)}{l^2\,(s_{BB},\, s_R)}\, \mathrm{d}S_{BB}\, \mathrm{d}S_R, \tag{3.4}$$

здесь: γ – угол образуемый лучом, соединяющим элементарные площадки s_{BB} – источника и s_R – приёмника, и нормалями $\mathbf{n}_{BB}^F$, $\mathbf{n}_R^F$; l – расстояние

между этими площадками. Принимая во внимание конструктивные особенности анализируемой системы, элементарными преобразованиями выражение (3.4) сводится к четырёхкратному интегралу:

$$\Phi_R^{BB} = L_{BB}\, h_{AD}^2 \int\limits_{y_1}^{y_2} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{0}^{2\pi} \int\limits_{0}^{\frac{1}{2}D_{AD}} G \,\mathrm{d}r\, \mathrm{d}\phi\, \mathrm{d}x\, \mathrm{d}y,$$
$$G = \frac{r}{\left[h_{AD}^2 + (r\cos\phi - x)^2 + (r\sin\phi - y)^2\right]^2}. \tag{3.5}$$

В выражении 3.5, пределы интегрирования x_1, x_2, y_1, y_2 двух внешних интегралов определяют положение и размеры фоточувствительной площадки приёмника. Для анализируемой системы эти пределы равны:

$$x_1 = y_1 = -\frac{1}{2}a_{px}, \quad x_2 = y_2 = \frac{1}{2}a_{px}. \tag{3.6}$$

Расчёты по рассмотренной формализованной математической модели анализируемой системы проводились в пакете MathCAD, версия 2001. Были получены следующие численные значения. Энергетическая светимость источника составила $M_{BB} = 6.035\,\text{Вт/м}^2$, поток от него в направлении на приёмник $\Phi_{BB} = 5.326 \cdot 10^{-4}$ Вт, а поток попадающий на приёмник $\Phi_R^{BB} = 3.921 \cdot 10^{-10}$ Вт.

Для анализируемой системы (модельного примера) в модели ПРХЛ задавался источник с плоской излучающей поверхностью и единичным коэффициентом излучательной способности. Поток от источника приравнивался к рассчитанной аналитически величине Φ_{BB}. Коэффициент отражения от поверхности приёмника принимался равным нулю. Количество трассируемых лучей задавалось на уровне $N_{tr} = 4 \cdot 10^9$. Все лучи имели единственную длину волны, соответствующую центру диапазона, $\lambda_0 = 4$ мкм. Всего было проведено 10 розыгрышей (время счёта одного варианта 50 минут на персональном компьютере с процессором AMD Phenom 9850 2.5 ГГц). Моделирование проводилось в программе Zemax, версия November 10, 2008.

По результатам серии расчётов контролировалась вариация величины $\Phi_R^{BB}|_Z$ – потока от источника попадающего на приёмник (центральный элемент):

$$V_\Phi|_Z = \frac{\sqrt{D\left[\Phi_R^{BB}|_Z\right]}}{M\left[\Phi_R^{BB}|_Z\right]}, \tag{3.7}$$

где: $M[\circ]$, $D[\circ]$ – операторы оценивания соответственно математического ожидания и дисперсии. Вариация $V_\Phi = 0.015$ указывает на устойчивость

модели. При этом $M\left[\Phi_R^{BB}|_Z\right] = 3.884 \cdot 10^{-10}$ Вт. Относительную систематическую ошибку рассчитывали в сравнении с величиной Φ_R^{BB}:

$$\Delta_\Phi|_Z = \left|\frac{M\left[\Phi_R^{BB}|_Z\right] - \Phi_R^{BB}}{\Phi_R^{BB}}\right| 100\,\%. \tag{3.8}$$

Величина $\Delta_\Phi|_Z = 0.943$ %, что указывает на несмещённость (с инженерной точки зрения) оценок, порождаемых численной моделью ПРХЛ.

Относительную среднеквадратичную ошибку вычисляли также в сравнении с величиной Φ_R^{BB}:

$$\varepsilon_\Phi|_Z = \left|\frac{\sqrt{M\left[\left(\Phi_R^{BB}|_Z - \Phi_R^{BB}\right)^2\right]}}{\Phi_R^{BB}}\right| 100\,\%. \tag{3.9}$$

Величина $\varepsilon_\Phi|_Z = 1.791$ %, в свою очередь, указывает на достаточную (с инженерной точки зрения) сходимость результатов расчётов.

Из анализа величин $\Delta_\Phi|_Z$ и $\varepsilon_\Phi|_Z$ – следует применимость метода прямого расчёта хода лучей к решению задачи оценивания интегральной интенсивности внутренних излучений оптического тракта для ИК диапазона. Тем не менее, был также проведён ряд пробных расчётов с поэтапным усложнением модели, посредством введения различных комбинаций излучающих, поглощающих, рассеивающих и отражающих элементов и добавления оптических покрытий. Эти дополнительные расчёты также показали адекватность описываемого метода.

3.2. Анализ пространственного распределения потока

На основе описанного в предыдущем подразделе модельного примера, было проведено исследование пространственного распределения потока излучения по поверхности решётки сенсоров форматом 320×256. При трассировке использовалось $N_{tr} = 4 \cdot 10^9$ лучей. Для центральной области приёмника (2×2 элемента), были получены следующие оценки величин: $M\left[\Phi_R^{BB}|_C\right] = 3.876 \cdot 10^{-10}$ Вт, $V_\Phi|_C = 8.69 \cdot 10^{-3}$, $\Delta_\Phi|_C = 1.143$ %, $\varepsilon_\Phi|_C = 1.430$ %. Необходимо отметить, что оценивание проводилось по результатам 10-ти розыгрышей (время счёта одного варианта 50 минут на персональном компьютере с процессором AMD Phenom 9850 2.5 ГГц). Относительная систематическая ошибка и относительная среднеквадратичная ошибки вычислялись в сравнении с величиной Φ_R^{BB}.

Теоретическая зависимость величины потока излучения попадающего на элемент решётки приёмника от расстояния между этим элементом

и оптической осью системы, вычислялась по формуле (3.5), через соответствующим образом заданные пределы интегрирования в двух внешних интегралах. В относительных величинах эта зависимость выражается следующим образом:

$$\hat{v}_{\Phi}(n_{px}) = \frac{\Phi_R^{BB}\left(x_1 = a_{px}\, n_{px},\, x_2 = a_{px}(n_{px}+1),\, y_1 = 0,\, y_2 = a_{px}\right)}{\Phi_R^{BB}\left(x_1 = 0,\, x_2 = a_{px}, y_1 = 0,\, y_2 = a_{px}\right)}, \quad (3.10)$$

где n_{px} – порядковый номер элемента решётки, отсчитываемый от центра решётки, $n_{px} = 0, \ldots, 127$.

Для величины $\hat{v}_{\Phi}$ получена её численная оценка v_{Φ} в модели ПРХЛ (с указанными выше условиями). Расчёт проводился усреднением по крестообразной области шириной в два элемента. Графики величин $\hat{v}_{\Phi}$ и v_{Φ} приведены на рисунке 2, а относительная систематическая ошибка оценки v_{Φ} в сравнении с $\hat{v}_{\Phi}$ – на рисунке 3. Гистограмма распределения относительной систематической ошибки приведена на рисунке 4.

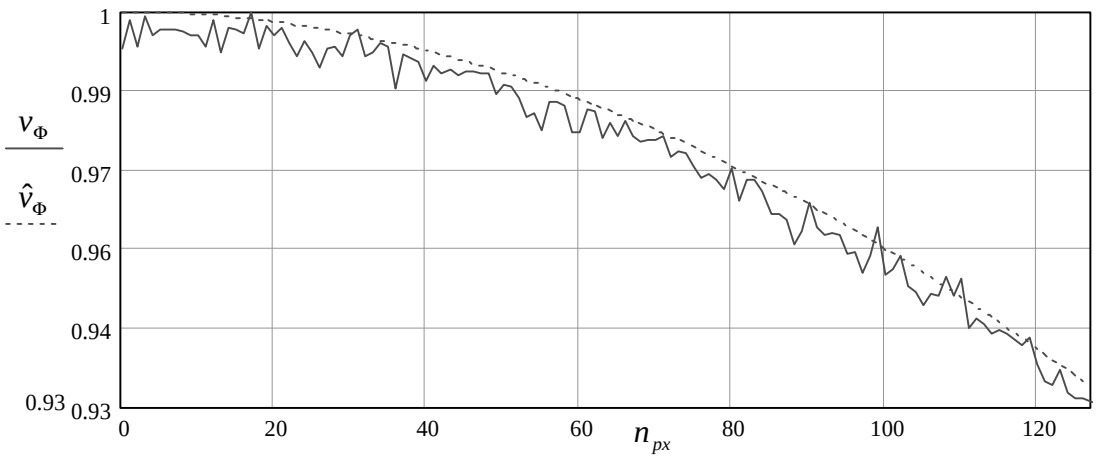

Рис. 2. Зависимость v_{Φ} и $\hat{v}_{\Phi}$ от n_{px}.

Из данных представленных на рисунке 3 видно, что относительная систематическая ошибка численной оценки величины $\hat{v}_{\Phi}$ не превышает 0.851 %, а $M[\Delta_v] = 0.314$ %. При этом ошибка (в первом приближении) достаточно однородна по всему диапазону углов падения излучения, а анализ гистограммы 4 показывает, что доля ошибок имеющих значения близкие к максимальным – незначительна.

Подобные результаты указывают на возможность конструктивного применения метода прямого расчёта хода лучей для оценивания функции пространственного распределения на матричном приёмнике излучения интенсивности внутренних излучений оптического тракта для ИК диапазона.

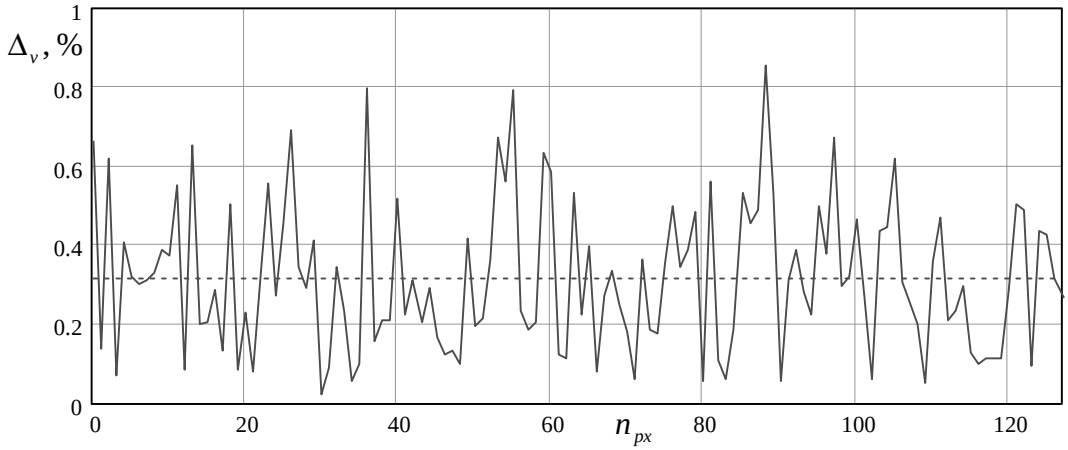

Рис. 3. Зависимость Δ_v от n_{px}.

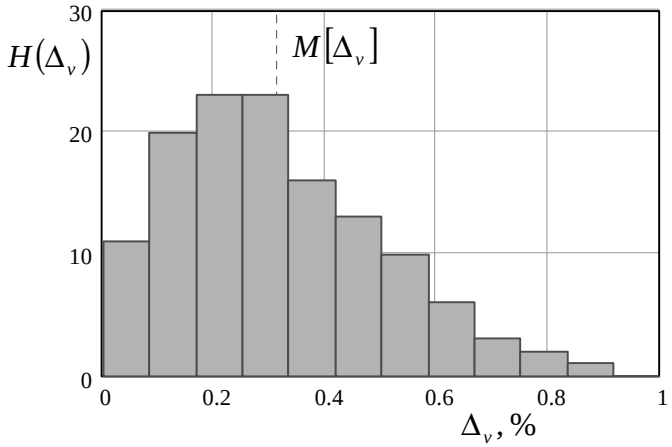

Рис. 4. Гистограмма распределения Δ_v.

4. Исследование внутренних излучений реального ИК-объектива

4.1. Исходные данные и допущения

В качестве объекта анализа был взят четырёхлинзовый объектив соответствующий штатному объективу реальной тепло-пеленгационной системы, функционирующей в среднем ИК-диапазоне (3-5 мкм). С данным объективом сопряжён матричный фотонный охлаждаемый приёмник форматом 320×256 элементов, с шагом решётки $a_{px} = 30$ мкм. Охлаждаемая апертурная диафрагма располагается после объектива.

Схема моделируемого оптического тракта приведена на рисунке 5, где обозначения имеют следующий смысл: 1 – первая часть оправы объектива; 2 – первая линза; 3 – вторая линза; 4 – третья линза; 5 – передняя стенка оправы линзового блока; 6 – оправа линзового блока; 7 – задняя стенка

оправы линзового блока; 8 – четвёртая линза; 9 – вторая часть оправы объектива; 10 – холодильник приёмника; 11 – задняя стенка оптического тракта; 12 – матричный приёмник излучения. При этом позиции: 2-4, 8 – будем считать оптическими элементами; 1, 5-7, 9 – оправами оптических элементов; 10, 11 – конструктивными элементами оптического тракта.

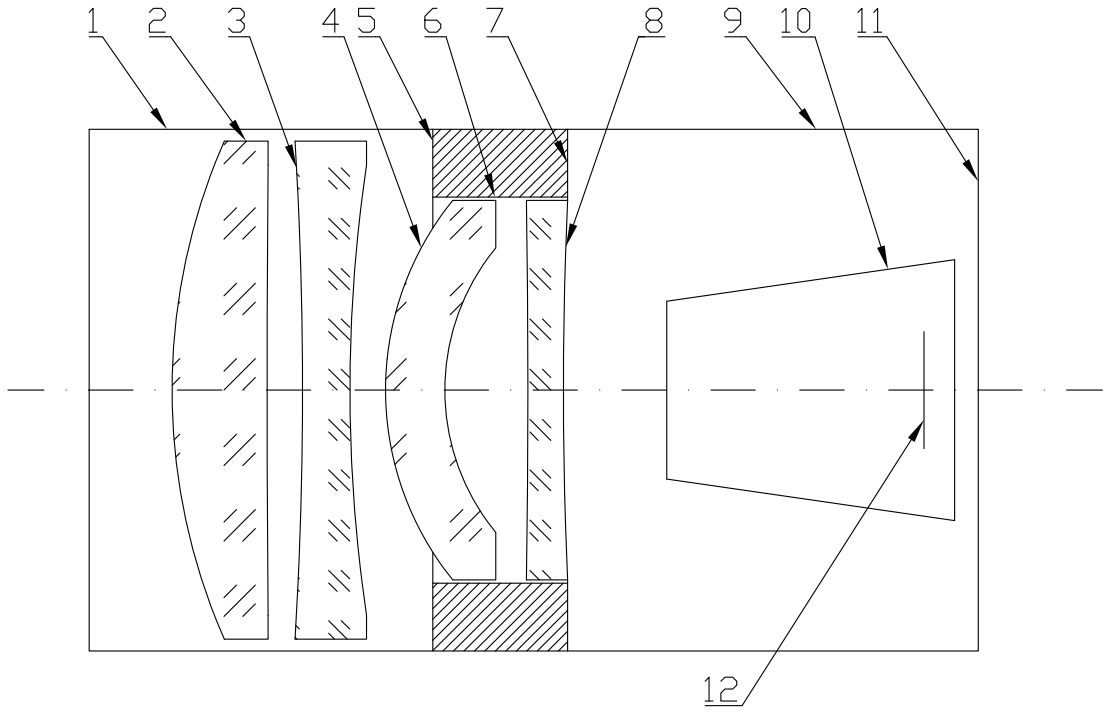

Рис. 5. Схема моделируемого оптического тракта.

Расчёт величины внутренних излучений моделируемого объектива проводился при следующих допущениях:

1. Материалы всех линз по оптическим параметрам (коэффициенты поглощения и преломления) соответствуют реальным, при этом три линзы объектива изготовлены из поликристаллического селенида цинка (ПО-4), и одна из фторида кальция (КО-3).

2. Согласно [6], принималось, что от каждой поверхности отражается 2 % от падающего излучения (на линзы нанесено многослойное просветляющее покрытие).

3. Потери на рассеяние в линзе не учитывались.

4. Исходя из анализа данных [6–8], принималось, что коэффициент поглощения в материале линз для диапазона 3-5 мкм соответствует таковому для длины волны 10.6 мкм. Все расчёты необходимо проводить для значений показателя поглощения 0.003, 0.01, 0.015 см$^{-1}$ –

это наиболее типичные значения, которые содержатся в различных источниках. Действительно, по данным, приведённым в книге [6], поглощение материала (ПО-4) на длине волны 10.6 мкм лежит в диапазоне (3-15) $\cdot 10^{-3}$ см$^{-1}$. Но по данным, приведённым в [7], показатели поглощения Иртрана-4 составляют для длин волн 8, 9, 10 и 11 мкм соответственно 0.14, 0.19, 0.13 и 0.13, а для селенида цинка < 0.003 см$^{-1}$ в диапазонах 3-5 и 8-12 мкм. Возможно это связано с тем, что с момента публикации этих значений (1975 год), качество материалов улучшилось и потери на поглощение уменьшились. В [8] указано, что показатель ослабления для длины волны 3, 4 мкм составляет 0.03, а для 5, 8, 10.6, 12.5 мкм для категории 1 составляет не более 0.02 см$^{-1}$.

5. Каждая линза с рабочих поверхностей излучает по закону Ламберта как серое тело с заданным коэффициентом излучательной способности.

6. Боковые поверхности линз считались поглощающими.

7. При расчёте паразитного потока который излучают линзы, считалось, что все линзы имеют одинаковую толщину равную 5 мм.

8. Принималось, что оптический тракт имеет постоянную температуру равную $T_{OT} = 300.80$ К, внутренняя поверхность холодильника находится при температуре $T_{CB} = 70$ К.

9. Оправы оптических элементов представляют собой цилиндры из полированного титана, являются зеркальными, с постоянным по поверхности коэффициентом отражения. Согласно [4], принималось, что интегральный коэффициент серости для полированного титана составляет 0.15.

10. Внутренняя часть холодильника является поглощающей.

11. Элемент решётки приёмника имеет квадратную форму, и его размер равен шагу решётки.

12. Коэффициент отражения от поверхности приёмника принимался равным нулю.

Расчёт интегральной интенсивности внутренних излучений моделируемого объектива проводился для спектрального диапазона: от $\lambda_1 =$ 3 мкм, до $\lambda_2 = 5$ мкм. Принималось, что хроматические аберрации объектива в этом диапазоне исправлены, поэтому для трассируемых лучей была определена единственная длина волны, соответствующая центру диапазона, $\lambda_0 = 4$ мкм.

4.2. Расчёт величины интегрального паразитного потока от объектива

По закону Планка (3.1), энергетическая светимость элементов оптического тракта, как источника излучения (в приближении АЧТ) при заданной температуре T_{OT}, составляет $M_{OT} = 6.035\,\text{Вт/м}^2$. Энергетическая светимость внутренней поверхности холодильника находящейся при температуре T_{CB}, составляет $M_{CB} = 2.2 \cdot 10^{-14}\,\text{Вт/м}^2$, поэтому вкладом потока M_{CB} – можно пренебречь. Таким образом, при расчёте интегрального паразитного потока, учитываются потоки излучения порождаемые следующими элементами: 2-4, 8 – от оптических элементов; 1, 5-7, 9-11 – от оправ оптических элементов и конструктивных элементов оптического тракта. Для элемента 10 учитывается только излучение его внешней поверхности.

На основании данных о форме и размерах элементов оптического тракта рассчитывается величина S_i^L – площадь i-го элемента. По площади элементов и их энергетической светимости M_{OT}, с учетом коэффициентов поглощения (серости) ε_i^L рассчитывается поток излучения от каждого элемента оптического тракта:

$$\Phi_i^L = M_{OT}\, S_i^L\, \varepsilon_i^L. \tag{4.11}$$

Поскольку элементарные источники излучения являются независимыми, расчёт для каждого элемента выполняется отдельно, и определяется величина $\Delta\Phi_R^{OT}$ – относительный вклад каждого источника в Φ_R^{OT} – величину общего паразитного потока порождаемого оптическим трактом и приходящего на приёмник. Необходимо отметить, что все источники моделируются в приближении поверхностных излучателей.

В результате расчётов были получены значения величин Φ_R^{OT} и $\Delta\Phi_R^{OT}$ при различных коэффициентах поглощения в материале. Распределение $\Delta\Phi_R^{OT}$ приведено в виде диаграммы на рисунке 6, а значения Φ_R^{OT} в таблице 1 (μ_{SL} – коэффициент поглощения в линзе, [см$^{-1}$]).

Таблица 1. Результаты расчёта величины Φ_R^{OT}

μ_{SL}, см$^{-1}$	0.003	0.01	0.015
Φ_R^{OT}, Вт	$1.9 \cdot 10^{-6}$	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$3.04 \cdot 10^{-6}$

4.3. Расчёт величины опорного потока

В качестве опорного потока приходящего на приёмник, относительно которого будет оцениваться влияние интегрального потока внутренних излучений оптического тракта, примем поток от чистого безоблачного неба. В диапазоне 3-5 мкм энергетическая яркость источника опорного потока

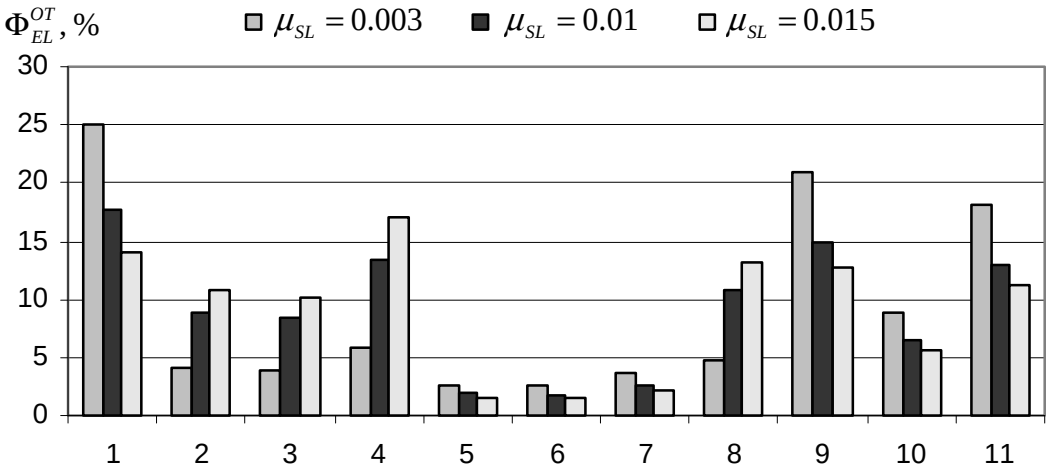

Рис. 6. Относительный вклад каждого элемента в общий паразитный поток.

Таблица 2. Результаты расчёта величины Φ_R^{B0}

μ_{SL}, см$^{-1}$	μ_{SL}°, %, при $d_{SL} = 1$ см	ρ_{SL},%	ε_{OT}	Φ_R^{B0}, Вт
0.003	0.68	2	0.83	$5.8 \cdot 10^{-6}$
0.01	2.27	2	0.81	$5.6 \cdot 10^{-6}$
0.015	3.39	2	0.79	$5.4 \cdot 10^{-6}$

составляет $L_{B0} = 0.42$ Вт/м^2 ст [9]. Величина опорного потока попадающего на приёмник, с учётом потерь в оптическом тракте рассчитывается по формуле:

$$\Phi_R^{B0} = L_{B0}\,\Omega_{AR}\,a_{px}^2\,\tau_{OT}. \tag{4.12}$$

Телесный угол мгновенного поля зрения приёмника Ω_{AR} определяется размерами и положением охлаждаемой апертурной диафрагмы. Величина τ_{OT} – коэффициент пропускания оптического тракта рассчитывается по формуле:

$$\tau_{OT} = (1 - \rho_{SL})^{n_L}\,\left(10^{-\mu_{SL}\,d_{SL}}\right)^{n_L}, \tag{4.13}$$

где: ρ_{SL} – коэффициент отражения от одной поверхности линзы; μ_{SL} – коэффициент поглощения в линзе, [см$^{-1}$], d_{SL} – толщина линзы, [см], n_L – число линз в оптическом тракте (в нашем случае $n_L = 4$).

Результаты расчёта величины Φ_R^{B0} для различных значений коэффициента поглощения в линзе, приведены в таблице 2.

4.4. Анализ результатов расчёта паразитного потока от объектива

На основании данных полученных в пунктах 4.2 и 4.3 работы, возможно сделать следующие выводы об основных свойствах паразитного потока порождаемого оптическим трактом и о его влиянии на качество входного сигнала тепло-пеленгационной системы.

Анализ диаграммы приведённой на рисунке 6, показывает, что при изменении коэффициента поглощения в линзах от 0.003 до 0.015 см$^{-1}$ происходит увеличение вклада потока от линз в поток на приёмнике с 18.3% до 51.1%. При этом основной вклад в общий паразитный поток дают оправа объектива (позиции 1, 9) и задняя стенка оптического тракта (позиция 11). Поток от холодильника (позиция 10) во всех рассмотренных случаях одинаков. По всей видимости, это связано с тем, что основная энергия, излучаемая с внешней поверхности холодильника, попадает на приёмник, отразившись от поверхности последней линзы, а коэффициент отражения на поверхности линзы задавался во всех случаях постоянным.

Все элементы оптического тракта (за исключением первой части оправы объектива, позиция 1) дают достаточно однородную по пространству засветку приёмника, а первая часть оправы засвечивает в основном периферийную область приёмника (типичный случай показан на рисунке 7).

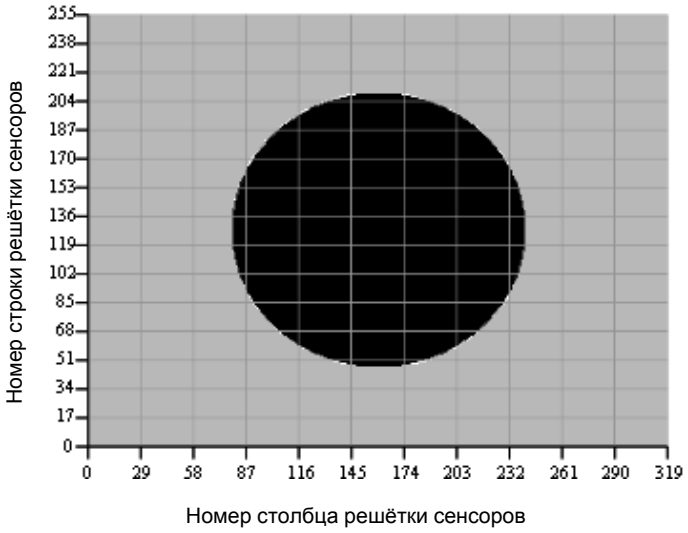

Рис. 7. Распределение засветки приёмника от первой части оправы (позиция 1). Серым цветом обозначена засвеченная область.

Подобное распределение возможно объяснить эффектом экранирования полного потока идущего от первой части оправы объектива к фоточувствительной поверхности приёмника, холодной диафрагмой и внутренней поверхностью холодильника.

Величина R_{BN} – отношение «опорный поток/внутренняя помеха», [дБ]:

$$R_{BN} = 10 \log \frac{\Phi_R^{B0}}{\Phi_R^{OT}}, \tag{4.14}$$

которая позволяет оценить потенциальную чувствительность системы в случае «идеального приёмника», даже в самом благоприятном случае, рав-

на 4.847 дБ ($\mu_{SL} = 0.003\,\text{см}^{-1}$, $T_{OT} = 300.80$ К). Это значение, для современных систем обнаружения объектов, представляется явно недостаточным, ибо они должны иметь запас по величине R_{BN} не менее 13 дБ – в этом случае паразитный поток практически не искажает статистические характеристики входного сигнала. В таблице 3 приведены значения величины R_{BN} в зависимости от температуры оптического тракта и коэффициента поглощения в линзах (при расчётах полагали, что коэффициент поглощения от температуры не зависит).

Таблица 3. Значения величины R_{BN}, [дБ] в зависимости от μ_{SL} и T_{OT}

μ_{SL}, см$^{-1}$	$T_{OT} = 280.30$ К	$T_{OT} = 300.80$ К	$T_{OT} = 321.30$ К
0.003	8.239	4.847	1.836
0.01	6.690	3.332	0.322
0.015	5.863	2.495	−0.529

Из данных таблицы 3 видно, что при $T_{OT} = 321.30$ К, для случая наибольшего поглощения в линзах объектива, паразитный поток порождаемый оптическим трактом превышает по величине опорный поток. На основе анализа зависимости R_{BN} от T_{OT} и от μ_{SL}, возможно сделать вывод, что для кардинального улучшения отношения «опорный поток/внутренняя помеха» в оптико-электронных системах ИК диапазона, необходимо оптический тракт охлаждать, и стабилизировать его температуру.

5. Заключение

В работе представлен метод позволяющий моделировать паразитные потоки излучения, порождаемые в оптических трактах оптико-электронных систем инфракрасного диапазона 3-5 и 8-14 мкм, приходящие на приёмник. В основе метода лежит универсальная математическая модель настраивающаяся на конкретную схему и параметры анализируемого оптического тракта (возможен прямой импорт конструктивных схем из широко распространённых конструкторских САПР). Модель учитывает излучение и многократные переотражения от линз, оправ и иных конструктивных элементов оптического тракта, оперирует реальными материалами и покрытиями. В модели также возможно гибко задавать конфигурацию и параметры приёмника излучения.

Ядром разработанной модели является вычислительная среда САПР Zemax. Выбор в пользу данного программного продукта был сделан исходя из того, что среди специализированных программ решающих подобные задачи (ASAP, LightTools, TracePro и др.), Zemax, при схожей функ-

циональности, имеет наименьшую стоимость анализа и синтеза оптических систем. Кроме того эта программа весьма доступна. Следовательно, на базе одной платформы САПР, возможно создавать комплексные имитационно-моделирующие системы для отработки оптических трактов оптико-электронных систем ИК диапазона. Это в свою очередь сокращает сроки и стоимость разработки, отладки и эксплуатации моделирующих стендов.

Разработанная методика анализа фоновых засветок порождаемых оптическими трактами ИК-систем позволяет получать абсолютные значения паразитного потока попадающего на приёмник, оценивать пространственное распределение потока по поверхности приёмника, а также анализировать вклад каждого из элементов тракта в суммарный паразитный поток. Совокупность формируемых моделью оценок параметров паразитного потока позволяет конструктивно решать не только прямую, но и обратную задачу – оптимизировать характеристики и конфигурацию оправ оптических элементов и иных конструктивных элементов оптического тракта для уменьшения уровня паразитных засветок.

В работе было проведено исследование адекватности описываемой модели, как для случая оценивания интегрального паразитного потока, так и для оценивания пространственного распределения паразитного потока. Показано, что относительная систематическая ошибка во всех случаях не превышает 1.14 % в сравнении с аналитическими расчётами по точным формулам. Планируется также проверка точности модели по результатам экспериментов с реальными объектами.

В настоящее время модель уточняется с целью повышения её информационных возможностей. Это в первую очередь касается оценивания статистических характеристик паразитного потока, и учёта рассеивания излучения в линзах и на элементах оправ оптических элементов и иных конструктивных элементах оптического тракта. Второй по важности задачей является расширение модели для возможности анализа многодиапазонных оптических систем. А также учёт в расчётах возможности появления в оптическом тракте сильных градиентов температур.

Авторы выражают благодарность А.О Ахметову за предоставленные вычислительные мощности, которые помогли выполнить требуемые расчёты за приемлемое время, и д.т.н., профессорам Д.В. Васильеву и В.Я. Колючкину за ряд ценных замечаний по улучшению формы подачи изложенного здесь материала.

Список литературы

1. *Якушенков Ю.Г.* Теория и расчёт оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999. – 479 с.

2. *Fischer R. E., Tadic-Galeb B., Yoder P. R.* Optical system design. McGraw-Hill, 2008, – 828 с.

3. *Голубь Б.И., Пахомов И.И., Хорохоров А.М.* Собственное (тепловое) излучение элементов оптических систем оптико-электронных приборов. М.:Машиностроение, 1978. – 144 с.

4. *Криксунов Л.З.* Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978. – 400 с.

5. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н.* Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.

6. Справочник технолога-оптика, *под ред. М.А. Окатова.* – 2-е изд., переаб. и доп.– Спб.: Политехника, 2004. – 679 с.

7. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. Пер. с англ. под ред. А.И. Горячева М.:Мир, 1978.– 416 с.

8. *ОСТ* 3 – 6307 – 87. Материал оптический поликристаллический марки ПО4.

9. *Кузнечик О.П., Захарич М.П.* Статистические характеристики яркости неба в области 0.5 – 12 мкм. Деп. Винити №2495, 1980. – 47 с.