

# **AB INITIO МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ СОБСТВЕННОГО «ПАРАЗИТНОГО» ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА**

**Макаренко А.В., Правдивцев А.В.**

*ОАО «НПК «Системы прецизионного приборостроения»*

*111024, Москва, Авиамоторная, 53*

[avp@rdcn.ru](mailto:avp@rdcn.ru)

## **АННОТАЦИЯ**

Рассмотрен метод прямого расчета хода лучей для определения теплового излучения оптических систем инфракрасного диапазона. При расчёте паразитного потока учитывается излучение оправ и оптических элементов, их конструкция и оптические характеристики. Приведён пример расчёта для объектива, работающего в диапазоне 8-14 мкм. Выполнено сравнение классического метода и предложенного. Показана возможность решения обратных задач по минимизации паразитного потока.

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время всё более широкое применение находят оптико-электронные системы (ОЭС) ИК-диапазона, в которых используются приёмники фотонного типа, работающие в режиме BLIP (Background Limited Infrared Photodectors – ограничение чувствительности приёмника флуктуациями фона). В этом случае пороговый поток эквивалентный шуму приёмника лимитируется флуктуациями фонового излучения, в состав которого также входит паразитное излучение оптического тракта, которое негативно влияет на отношение «сигнал/фон». В случае тепловизионных приборов, отношение «сигнал/фон» функционально связано с минимально разрешаемой температурой. Таким образом, для создания системы, высокоэффективной по критерию «обнаружительная способность», необходимо, помимо всего прочего, минимизировать паразитный поток в оптическом тракте [1].

Для предварительной оценки характеристик ОЭС, необходимо определить величину паразитного потока еще на этапе проектирования, что бы, в случае необходимости, внести изменения в конструкцию. 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.

В [2] и [3] описывается так называемый метод «серых тел», который определяет поток от элементов оптической системы, путём представления их серым телом, расположенным перед приёмником излучения. В определённой мере этот подход можно считать классическим, ибо он наиболее распространён среди разработчиков ОЭС. Он оперирует коэффициентами пропускания линз и излучательной способностью источника. Но в нём не учитываются многократные переотражения потока, порождаемого линзами, на самих линзах и деталях оправы, и не принимаются во внимание излучения оправ и иных конструктивных элементов оптического тракта. В [4] приведена улучшенная версия полуэмпирического метода «серых тел» – учитывается форма оптических элементов, есть возможность рассчитать распределение паразитного потока по фоточувствительной плоскости приёмника излучения. Но при этом она никак не принимает во внимание оправы и конструктивные элементы оптического тракта, и дополнительно обладает двумя крупными недостатками. Во-первых, составление аналитических выражений для реальных оптических трактов является весьма трудоёмкой задачей. Составление и отладка численной схемы реализующей вычисления также очень сложно. Во-вторых, метод плохо сочетается с автоматизированным синтезом и оптимизацией оптических систем.

В [2] предлагается идея об использовании недетерминированного расчёта хода лучей для определения паразитного потока, но не описан механизм её реализации.

В настоящее время требования к ОЭС ужесточаются. Зачастую от них требуются экстремальные характеристики. Это приводит к необходимости учитывать все нюансы, которые могут повлиять на итоговую эффективность их функционирования. Так как паразитный поток от оптического тракта напрямую влияет на отношение «сигнал/фон», разработка методов для его точного оценивания и поиска путей его минимизация является безусловно актуальной и практически значимой задачей.

В настоящей работе описан разработанный авторами *ab initio* метод, свободный от означенных выше недостатков. Он позволяет оценить величину паразитного потока оптических систем ИК-диапазона (3-5 и 8-

14 мкм) уже на этапе их проектирования. Кроме того, он указывает пути минимизации собственного теплового излучения оптических систем.

## **2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Авторами [1, 5] была разработана универсальная математическая модель, настраиваемая на конкретную конструктивную схему и параметры анализируемого оптического тракта. Она позволяет получать абсолютные значения паразитного потока попадающего на приёмник излучения, оценивать пространственное распределение потока по поверхности приёмника, а также анализировать вклад каждого из элементов тракта в суммарный паразитный поток.

Модель, на основании прямого расчёта хода лучей от источников (используется вычислительное ядро оптического САПР), определяет интегральный поток излучения, попадающий на приёмник. При этом учитываются свойства среды распространения. Как указано в [4], вычисление освещённости в плоскости изображения оптической системы, посредством трассировки реального хода луча, является самым точным, так как учитывает аберрации оптической системы.

Модель оперирует 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; пространственное распределение температуры в оптическом тракте; 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 формирует корректные оценки: абсолютных, выраженных в  $\text{Вт}/\text{м}^2$  значений паразитного потока попадающего на приёмник; пространственного распределения потока по поверхности приёмника; относительного вклада каждого из элементов оптического тракта в суммарный паразитный поток.

Модель была проверена с помощью аналитических вычислений на ряде простых примеров [1].

### 3. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ (ОБЪЕКТИВ 8-14 МКМ)

В качестве примера рассмотрим использование модели для обследования 3-х линзового светосильного объектива, предназначенного для работы в диапазоне LWIR (8.5-12 мкм) [6]. Объектив имеет следующие параметры: относительное отверстие – 1:1.2;  $f' = 80$  мм;  $2\omega = 12^\circ$ . Все линзы изготовлены из германия (Ge). Схема объектива приведена на рисунке 1. Обозначения имеют следующий смысл: 1 – первая линза; 2 – первая оправа; 3 – вторая линза; 4 – вторая оправа; 5 – третья линза; 6 – светофильтр; 7 – матричный приёмник излучения типа Bird 384, производства компании SemiConductor Devices.

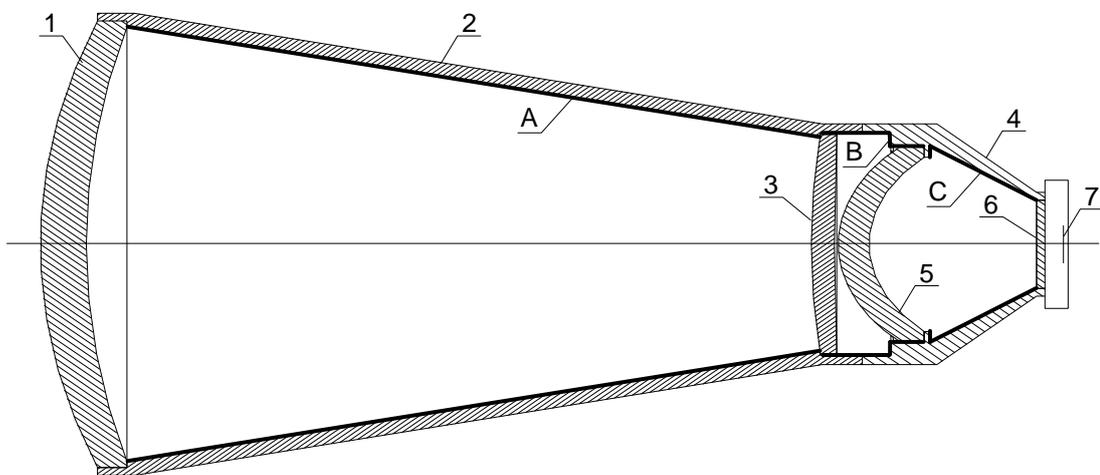


Рис. 1. Схема моделируемого светосильного ИК-объектива

Оптические характеристики материала взяты из базы данных программы Zemax [7], формулы и характеристики оптических покрытий из работы [8].

Сначала определим величину потока на приёмнике, на основании метода «серых тел» [2, 3]. В результате расчета получаем, что величина потока на приёмнике равна  $\Phi_{RC} = 2.05 \cdot 10^{-4}$  Вт.

Далее рассчитаем величину собственного излучения оптической системы по технологии MINOS [1, 5], для двух вариантов коэффициентов отражения оправ: I – зеркальные оправы,  $\rho = 0.99$ ; II – поглощающие оправы,  $\rho = 0.01$ . Источниками излучения являются линзы 1, 3, 5 и оправы А, В, С. Излучение светофильтра не рассматриваем. При расчёте паразитного потока будем полагать, что объектив находится при температуре 20°C (подробное описание технологии расчёта приведено в [1]). Поток на приёмнике в случае варианта I – равен  $5.43 \cdot 10^{-3}$  Вт; в случае II –  $1.08 \cdot 10^{-2}$  Вт. Величины потока от оптических элементов в этом случае равны  $5.18 \cdot 10^{-3}$  Вт и  $2.4 \cdot 10^{-3}$  Вт, соответственно. Для сравнения вычислим величину потока, приходящего на приёмник излучения от неба; его величина составляет  $6.84 \cdot 10^{-4}$  Вт [6]. Отношение потока от объектива к потоку от неба для случая I – равно 7.93, а для случая II – 15.89. Это означает, что оптический тракт оказывает значительное отрицательное действие на качество работы оптико-электронной системы, в целом.

Сравним результаты, полученные различными методами. В методе MINOS учитываются характеристики оправ и конструктивных элементов, что позволяет более точно рассчитывать поток на приёмнике. Величина потока, полученного классическим методом меньше, чем значение, полученное по технологии MINOS. Это объясняется тем, что в классическом методе не учитывается форма оптических элементов (они предполагаются плоскими) и переотражения от поверхности оптических элементов.

Таким образом, метод «серых тел» порождает весьма заниженные оценки паразитного потока.

#### **4. МИНИМИЗАЦИЯ ПАРАЗИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ)**

Из полученных данных видно, что собственное паразитное излучение оказывает существенное влияние на отношение «сигнал/фон». Поэтому остро встаёт вопрос об уменьшении паразитного излучения. Охлаждение оптического тракта является основным и очень эффективным способом снижения уровня внутренних паразитных излучений, приходящих на приёмник. Но в ряде случаев оно не применимо из-за технологических, энергетических, массогабаритных или стоимостных ограничений накладываемых на изделие. Другой способ – это создание внутренних поверхностей оптического тракта со специальной геометрией, применение внутренних

диафрагм. Основное ограничение для него, как правило, это габариты и масса оправ. Есть ещё третья возможность – варьирование свойств поверхности оправ и конструктивных элементов оптической системы.

Технология MINOS позволяет решить задачу минимизации паразитного потока третьим способом. В работе авторов [6] рассмотрено влияние оптических характеристик оправ и конструктивных элементов на суммарный поток. Показано, что подбор оптимальных коэффициентов теплового излучения и отражательных характеристик оправ и конструктивных элементов оптического тракта, вполне может уменьшить паразитный поток в 1.5 раза относительно его средневероятного значения при отсутствии оптимизации. Отметим, что в данный момент функциональные возможности MINOS расширяются – разрабатывается блок оптимизации формы оправ.

Таким образом, технология MINOS [5] решает не только прямые задачи по исследованию конструкции оптического тракта, но и обратные, которые включают в себя минимизацию паразитного излучения оптических систем ИК-диапазона. Использование этих возможностей вкупе позволяет увеличить конечную эффективность разрабатываемых систем.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена моделирующая технология MINOS, которая позволяет выполнять расчёт собственного паразитного излучения оптических трактов ИК-диапазона методом *ab initio*. Она основывается на полноценном расчёте хода лучей от источников к приёмнику излучения, и является существенно более точной, по сравнению с классическим методом «серых тел». Основные возможности моделирующей среды:

1. Определение интегрального потока, создаваемого оптической системой на приёмнике излучения; определение вклада каждого элемента в общий поток; расчёт распределения потока по фоточувствительной поверхности приёмника излучения.
2. Решение задачи по минимизации паразитного потока путём варьирования формы и оптических свойств оправ и конструктивных элементов.
3. Возможность анализа составных паразитных потоков: собственное излучение оптического тракта и яркие точечные и распределённые внешние источники излучения.

При помощи модели были получены следующие результаты:

1. Выполнена оценка собственного паразитного излучения создаваемого объективами, работающими в диапазоне 3-5 мкм [1] и 8-12 мкм [6].
2. Получен оптимальный по критерию минимизации паразитного потока набор характеристик оправ для объектива, работающего в диапазоне 8-12 мкм.
3. Исследована возможность моделирования внешнего фонового и паразитного излучения.

Таким образом, использование моделирующей технологии MINOS позволяет синтезировать оптические тракты оптико-электронных систем оптимальные по критерию «обнаружительная способность».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаренко А.В., Правдивцев А.В., Юдин А.Н. *Метод оценивания внутреннего паразитного излучения оптических трактов инфракрасных систем.* // Электромагнитные волны и электронные системы, 2009, №12, С. 28-37.
2. Fischer R. E., Tadic-Galeb V., Yoder P. R. *Optical system design.* McGraw-Hill, 2008, 828с.
3. Якушенков Ю.Г. *Теория и расчёт оптико-электронных приборов.* М.: Логос, 1999, 479с.
4. Голубь Б.И., Пахомов И.И., Хорохоров А.М. *Собственное (тепловое) излучение элементов оптических систем оптико-электронных приборов.* М.: Машиностроение, 1978, 144с.
5. Технология MINOS. // Официальный web-сайт научно-исследовательской группы «Конструктивная Кибернетика». / URL: <http://www.rdcn.ru/theory/results/minos.shtml>.
6. Макаренко А.В., Правдивцев А.В. *Анализ влияния свойств поверхности оправ на величину теплового излучения оптических систем.* // Международная конференция «Прикладная Оптика-2010» / Сборник докладов. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2010.
7. *Handbook of Optical Constants of Solids.* Ed by Edward D. Palik. Elsevier. 1998. 3227 p.
8. Гайнутдинов И.С., Шувалов Н.Ю., Сабиров Р.С., Иванов В.А., Гареев Р.Р., Мирханов Н.Г. *Просветляющие покрытия на подложках из германия и кремния в окнах прозрачности ИК области спектра 3-5 и 8-12 мкм.* // Оптический журнал, Т. 76, № 5. 2009, С. 68-72.