

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ОПРАВ НА ВЕЛИЧИНУ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Макаренко¹, А.В. Правдивцев^{1,2}
1 – ОАО «НПК «СПП», 2 – МГТУ им. Н.Э. Баумана
E-mail: avp@rdcn.ru, Тел.: +7 (916) 439-22-99

Рассмотрена применимость метода прямого расчета хода лучей для минимизации величины теплового излучения оптических систем, посредством варьирования свойств поверхности оправ и конструктивных элементов. Изучено влияние коэффициентов теплового излучения оправ и их отражательных характеристик на величину паразитного потока в объективе, предназначенном для работы в диапазоне 8-14 мкм.

Введение

Зачастую в современных оптико-электронных системах ИК-диапазона применяют 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].

Охлаждение оптического тракта является основным и очень эффективным способом уменьшения 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.

В настоящей работе проведено предварительное изучение влияния коэффициентов теплового излучения и отражательных характеристик оправ и конструктивных элементов оптической системы на общий уровень её внутреннего паразитного излучения в диапазоне 8-14 мкм.

Постановка задачи

Рассмотрим 3-х линзовый светосильный объектив, предназначенный для работы в диапазоне LWIR (8.5-12 мкм). Объектив имеет следующие параметры: относительное отверстие – $1 : 0.95$; $f' = 80$ мм; $2\omega = 8.4^\circ$. Из оптических материалов в нём применяется только германий (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.

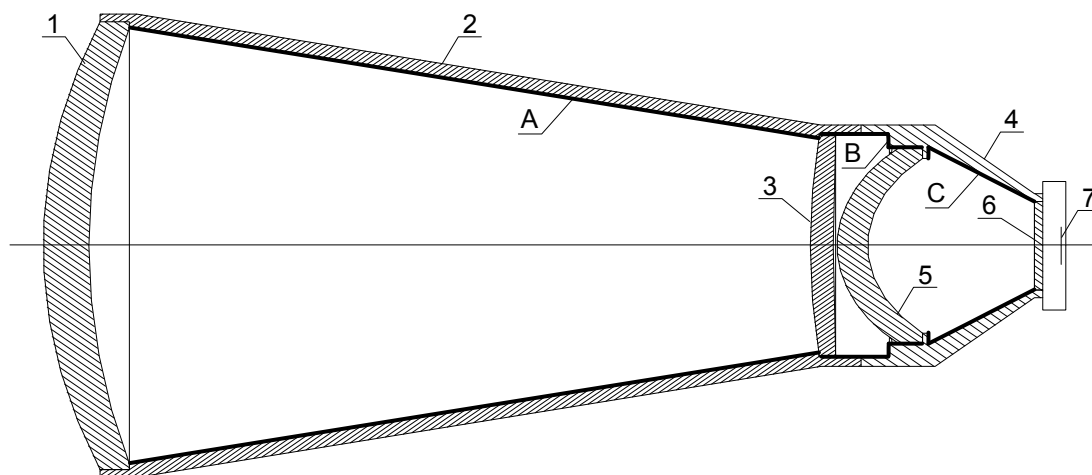


Рис. 1. Схема моделируемого светосильного ИК-объектива

Коэффициент пропускания объектива на оси – 0.61, на краю поля – 0.6. Характеристики оптического материала взяты из базы данных программы Zemax [2]. Необходимо, отметить, что в части коэффициента поглощения, их значения не вполне соответствуют реально производимым материалам [3]. Формулы и характеристики оптических покрытий взяты из работы [4].

Требуется изучить влияние коэффициентов теплового излучения и отражательных характеристик оправ и конструктивных элементов объектива на общий уровень его внутреннего паразитного излучения. Также следует найти конфигурацию этих параметров, соответствующую минимальному уровню паразитного излучения.

Численный эксперимент

Для решения поставленной задачи использовался метод MINOS [5] – метод оценивания внутренних паразитных излучений инфракрасных оптических трактов, основанный на прямом расчёте хода лучей в оптическом САПР Zemax [1].

При создании модели паразитных излучений изучаемого объектива, его реальные оправы и конструктивные элементы разбивались на три группы А, В, С (см. рисунок 1), и представлялись в упрощённом виде. Каждой группе элементов поочередно присваивалось пять значений коэффициента отражения ρ_0 : 0 – 0.99; 1 – 0.70; 2 – 0.50; 3 – 0.28; 4 – 0.01. Таким образом формировался блок из 125-ти расчётных конфигураций. Для каждой расчётной конфигурации оценивались величины двух потоков излучения, приходящего на приёмник: Φ_M – от оправ и конструктивных элементов объектива; Φ_L – от линз объектива. При этом каждый блок конфигураций рассчитывался при трёх видах отражений от оправ: М – зеркальное; L – ламбертово; О – матовое (50 % зеркальное, 50 % – ламбертово). Размер расчётного массива, таким образом, включал в себя 375 расчётных конфигураций. Для получения несмещённых и эффективных оценок вычисляемых величин [6] использовался метод Монте-Карло, над каждым расчётным массивом осуществлялось порядка 30-ти розыгрышей.

Температура линз и оправ объектива принималась равной $T = 293.15$ К, что соответствует светимости абсолютно чёрного тела $M_{BB} \approx 95.0665$ Вт/м². Коэффициент отражения внутренних полостей приёмника был принят 0.99. Для трассировки использовалось 200 тыс. лучей [1]. При расчёте учитывались покрытия оптических элементов и коэффициенты поглощения материалов линз.

По результатам численного эксперимента вычислялась величина $\Phi_{OS} = \Phi_M + \Phi_L$, и для неё рассчитывалась оценка математического ожидания. После чего каждый из трёх блоков расчётных конфигураций упорядочивался по возрастанию $M[\Phi_{OS}]$. Здесь и далее $M[\cdot]$ – оператор математического ожидания. Конфигурация с меньшим порядковым номером имеет меньшую величину паразитного потока.

Анализ результатов

На рисунке 2 приведены графики изменения $M[\Phi'_{OS}]$ для каждой из расчётных конфигураций n_c , и трёх видов отражений. Величина Φ'_{OS} – нормированный на единицу паразитный поток от объектива.

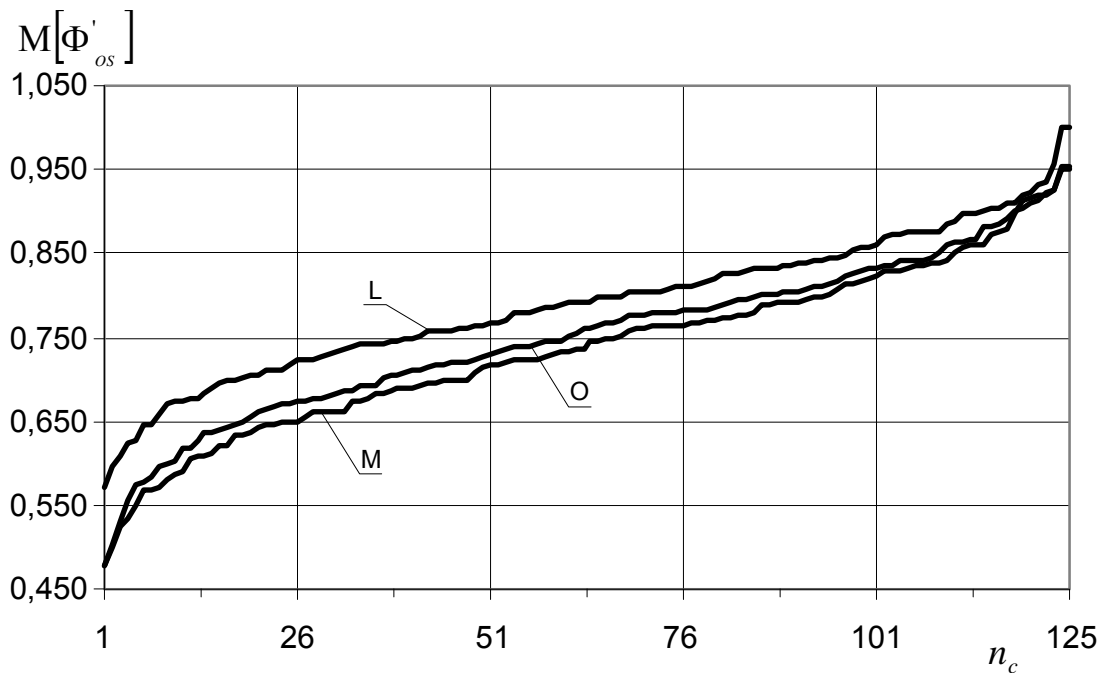


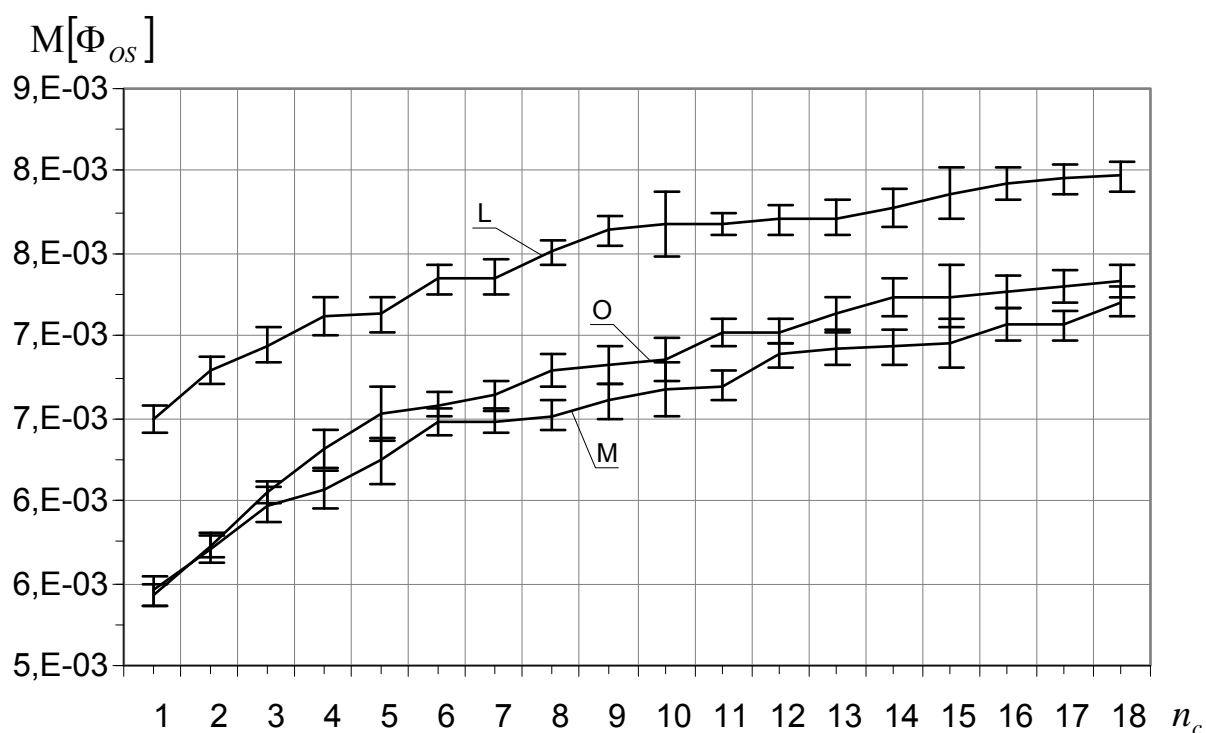
Рис. 2. Оценка мат. ожидания нормированного паразитного потока от объектива Φ'_{OS}

Анализ рисунка 2 показывает, что величина внутреннего паразитного потока, приходящего на приёмник, действительно зависит и от коэффициентов теплового излучения оправ объектива и от их отражательных характеристик. При этом оптимальная конфигурация параметров относительно средневероятной конфигурации, взятой по расчётному массиву, имеет поток меньший в ~ 1.58 раз. Оптимальные конфигурации с наименьшим паразитным потоком относятся к оправам имеющим либо чисто зеркальный характер отражения (M), либо матовый (O). Оправы с ламбертовым законом отражения (L), в зоне минимальных паразитных потоков, имеют существенно худшие характеристики. При этом данные табл. 1 демонстрируют (для оптимальной конфигурации параметров) увеличение вклада оправ в суммарный паразитный поток при последовательном переходе от зеркального отражения к матовому и затем к ламбертовому. Оптимальные конфигурации коэффициентов теплового излучения $\{A B C\}$, для всех типов отражений от оправ – $\{0 0 0\}$, наихудшие – $\{4 4 4\}$.

Соотношения между паразитными потоками

Параметр	Вид отражения от оправ		
	М – зеркальное	О – матовое	Л – ламбертово
Φ_{OS}/Φ_M	28.636	21.658	20.809
Φ_L/Φ_M	12.638	9.607	7.731

Для оценки достоверности сделанных выводов следует проанализировать данные рисунка 3. На нём приведены графики изменения $M[\Phi_{OS}]$ для первых 18-ти расчётных конфигураций n_c , и трёх видов отражений. Величина Φ_{OS} – поток от объектива выраженный в «Вт». Границы доверительных интервалов указаны для доверительной вероятности $\beta = 0.95$.

Рис. 3. Оценка мат. ожидания потока от объектива Φ_{OS} для первых 18-ти конфигураций

Из рисунка 3 видно, что все конфигурации коэффициентов теплового излучения оправ с ламбертовым законом отражения (L), в зоне минимальных паразитных потоков, существенно хуже таковых для зеркального (M) и матового (O) законов отражения. При этом первые 3 конфигурации M и O статистически неразличимы.

Чтобы оценить реальный выигрыш от минимизации паразитного потока объектива, сравним его абсолютную величину с опорным потоком – от чистого безоблачного неба. В диапазоне 8.5-12 мкм, энергетическая яркость неба (по нормализованным данным работы [7]) составляет $L = 4.64 \text{ Вт/м}^2 \text{ ср}$, а поток излучения, приходящий соответственно на приёмник, равен $\Phi_{B0} = 6.841 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$. Методика расчёта этой величины подробно описана в работе [1]. Отношение паразитного потока к опорному, для оптимальной конфигурации параметров оправ, равно $\Phi_{OS}/\Phi_{B0} \approx 7.94$, для средневероятной конфигурации – 12.61. Из этих данных явственно следует, что потенциальная чувствительность ИК-системы (для случая «идеального приёмника»),

существенно возрастает при оптимизации параметров оправ оптического тракта, и минимизации его внутреннего паразитного излучения.

Заключение

По результатам проведённой работы возможно сформулировать ряд предварительных выводов, по крайней мере действительных для диапазона 8-14 мкм:

1. Статистически значимо показано влияние коэффициентов теплового излучения и отражательных характеристик оправ и конструктивных элементов оптического тракта на общий уровень его внутреннего паразитного излучения.
2. Продемонстрирована применимость метода MINOS [1, 5] для решения обратных оптимизационных задач связанных с минимизацией уровня внутреннего паразитного излучения оптических трактов ИК-диапазона.
3. 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.

В дальнейшем планируется расширить исследования по данному направлению на диапазон 3-5 мкм, а также более детально исследовать вопросы зависимости внутреннего паразитного излучения от отражательных характеристик оправ в случае ламбертового отражения. Кроме того, предполагается изучение комбинированного случая внешних и внутренних паразитных засветок.

Авторы благодарят Сергея Жаворонкова и Виктора Трофимова за предоставленные вычислительные мощности, которые позволили выполнить расчёты за приемлемое время.

Литература

1. Макаренко А.В., Правдивцев А.В., Юдин А.Н. Метод оценивания внутреннего паразитного излучения оптических трактов инфракрасных систем. // Электромагнитные волны и электронные системы. 12. 2009.
2. Handbook of Optical Constants of Solids. Ed by Edward D. Palik. Elsevier. 1998. 3227 p.
3. Кристаллы германия оптические. Физико-химические свойства. РТМ 3-1640-83. – 1983.
4. 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.
5. Технология MINOS. // Официальный web-сайт научно-исследовательской группы «Конструктивная Кибернетика». / URL: <http://www.rdcn.ru/theory/results/minos.shtml>.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. Школа., 2006. – 575 с.
7. Кузнечик О.П., Захарич М.П. Статистические характеристики яркости неба в области 0.5-12 мкм. Деп. ВИНТИ № 2495, 1980. – 47 с.