

Моделирование светодиодного устройства равномерной засветки

Клюшников М.В., Данилов С.Г., Квитка В.Е.

Филиал АО РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»

Одной из задач при наземной калибровке оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является создание облучателя (устройства), обеспечивающего равномерную засветку всего фоточувствительного поля аппаратуры излучением заданного спектрального состава. Анализ калибровочных изображений позволяет получить данные о геометрической неоднородности чувствительности.

Основными требованиями, предъявляемыми к излучению, генерируемому устройством равномерной засветки (УРЗ), являются:

- соответствие спектру солнечного излучения;
- соответствие площади облучаемой поверхности входному зрачку телескопа;
- однородность уровней плотностей падающего потока излучения;
- высокая временная стабильность параметров излучения.

Понятно, что создание облучателя, удовлетворяющего в полной мере вышеперечисленным требованиям, практически невозможно. Поэтому на практике обычно следуют по трем основным направлениям:

- использование коэффициентов пересчёта, учитывающих различие солнечного и искусственного спектров излучения;
- применение специальных оптических фильтров, оптимизированных под используемый источник света;
- применение в осветителе несколько источников света, каждый из которых излучает только в относительно узком спектральном диапазоне длин волн с заданной интенсивностью.

Первый способ наиболее прост, т.к. позволяет ограничиться одним источником света в осветителе. Как правило, источником является лампа накаливания с температурой тела свечения 2898 К, что соответствует максимуму излучения на длине волны 1 мкм (источник типа «А»). Устройства равномерной засветки, сделанные по такому принципу, просты в исполнении, однако имеют несколько существенных недостатков:

- относительно малый рабочий ресурс, обусловленный старением тела свечения лампы накаливания;
- необходимость достаточно частой калибровки;
- низкая временная стабильность, обусловленная колебаниями электрического тока, протекающего через тело свечения лампы.

Очевидно, что временная нестабильность излучения может привести к критическим погрешностям в результатах при калибровке аппаратуры.

Во втором способе также используется единственный источник света, в качестве которого часто применяются дуговые (ксеноновые, металлогалогенные и др.) и газоразрядные лампы. Очень перспективным представляется использование серных (PLS) ламп, отличающихся повышенным (до нескольких десятков тысяч часов) рабочим ресурсом. При этом с помощью светофильтров достигается хорошее воспроизведение спектра солнечного излучения. Однако сами светофильтры поглощают значительную часть энергии излучения лампы, что обуславливает необходимость интенсивного охлаждения системы.

В третьем случае задача решается «сборкой» солнечного спектра из спектров нескольких источников света заданной интенсивности. В качестве источников света в данных УРЗ могут быть использованы лампы различных типов (например, пары – ксеноновая лампа и лампа накаливания или серная лампа и также лампа накаливания). Однако, в связи с бурным развитием светодиодной индустрии представляет несомненный интерес изучение вопроса о возможности создания УРЗ на основе светодиодных излучателей. Подобная проблема неоднократно освещалась в технической литературе. Так в работе [1] показано, что минимальная приведенная относительная погрешность аппроксимации спектра солнечного излучения набором из семи типов светодиодов составляет 21,4%.

Целью работы было исследование возможности создания светодиодного УРЗ, спектральный состав излучения которого был максимально близок к солнечному спектру в диапазоне длин волн 350...1000 нм. Таким образом, рассматривалась задача определения набора групп светодиодов различного типа, имитирующих при их совместной работе солнечный свет, с вычислением относительной яркости каждой группы. При этом количество типов используемых светодиодов не ограничивалось.

Для описания сходства солнечного и искусственного спектров был использован метод спектрально-угловой классификации, применяемый при обработке гиперспектральных снимков [2]. Допустим, имеется нормированный солнечный спектр $E_{\text{сол}}(\lambda)$ (т.е. для всех λ выполняется $E_{\text{сол}}(\lambda) \leq 1$). Далее имеется набор из N групп одинаковых по спектру светодиодов, каждая из которых также характеризуется нормированным спектром $E_k(\lambda)$. Обозначим шаг дискретизации спектров, как $\Delta\lambda$. Тогда количество отсчётов каждого спектра m можно выразить по формуле (1):

$$m = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta\lambda} + 1 \quad (1)$$

где λ_1 и λ_2 соответственно коротковолновая и длинноволновая границы рабочего спектрального диапазона УРЗ.

Нормированный спектр светодиодов k -ой группы (в m -мерном пространстве) может быть представлен в виде m -мерного вектора $\mathbf{E}_k = (E_k(\lambda_1) \ E_k(\lambda_1 + \Delta\lambda) \ \dots \ E_k(\lambda_2))$. Нормированный солнечный спектр, соответственно, будет иметь вид $\mathbf{E}_{\text{сол}} = (E_{\text{сол}}(\lambda_1) \ \dots \ E_{\text{сол}}(\lambda_2))$. Тогда задача синтеза спектра УРЗ из N групп светодиодов сводится к поиску весов w_k в линейной комбинации (2) при условии $0 \leq w_k \leq 1$.

$$\mathbf{E}_{\text{УРЗ}} = w_1 \cdot \mathbf{E}_1 + \dots + w_N \cdot \mathbf{E}_N \quad (2)$$

Мерой сходства вектора $\mathbf{E}_{\text{сол}}$ солнечного спектра и вектора $\mathbf{E}_{\text{УРЗ}}$ спектра УРЗ примем величину $\cos\theta$, определяемую через скалярное произведение векторов в m -мерном пространстве по формуле (3). В случае полного совпадения спектров $E_k(\lambda)$ и $E_{\text{сол}}(\lambda)$ получится, что $\cos\theta = 1$.

$$\cos\theta = \frac{(\mathbf{E}_{\text{УРЗ}} \cdot \mathbf{E}_{\text{сол}})}{\|\mathbf{E}_{\text{УРЗ}}\| \cdot \|\mathbf{E}_{\text{сол}}\|} = \frac{(E_{\text{сол}}(\lambda_1) \cdot E_{\text{УРЗ}}(\lambda_1) + \dots + E_{\text{сол}}(\lambda_2) \cdot E_{\text{УРЗ}}(\lambda_2))}{\sqrt{E_{\text{сол}}^2(\lambda_1) + \dots + E_{\text{сол}}^2(\lambda_2)} \cdot \sqrt{E_{\text{УРЗ}}^2(\lambda_1) + \dots + E_{\text{УРЗ}}^2(\lambda_2)}} \quad (3)$$

Как правило, спектральные свойства светодиодов описываются в каталогах производителей в виде нормированных спектральных яркостей, т.е. функций, принимающих значения от 0 до 1. Описанный способ определения «сходства» спектров имеет в этих условиях большое достоинство: не важны абсолютные значения яркостей, нужны лишь относительные спектральные характеристики светодиодов. В терминах линейной алгебры это означает, что нам не важны длины векторов $\mathbf{E}_{\text{сол}}$ и $\mathbf{E}_{\text{УРЗ}}$, а интересен лишь угол между ними.

Реализация предложенного алгоритма выполнена в среде matlab. В качестве исходных данных использованы нормированные спектры светодиодов и спектр солнечного излучения, дискретизированные с шагом 5 нм. В качестве спектра солнечного излучения принимается спектр АЧТ с температурой 6000 К. Перебором всех возможных линейных комбинаций (2) при всех возможных значениях «веса» w_k k -ой группы светодиодов находился оптимальный состав УРЗ, т.е. состав, при котором значение $\cos\theta$ принимало максимальное значение. В созданной программе веса w_k принимали дискретные значения от 0 до 1 с дискретом 0,1.

После анализа каталогов различных производителей были выбраны 12 типов светодиодов (4 для ультрафиолетового диапазона, 4 для видимого и 4 для ближнего инфракрасного), суммарный спектр которых перекрывает весь рабочий диапазон длин волн 350...1000 нм. Результат моделирования спектра УРЗ показан на рисунке (1). Гладкой кривой показан нормированный солнечный спектр.

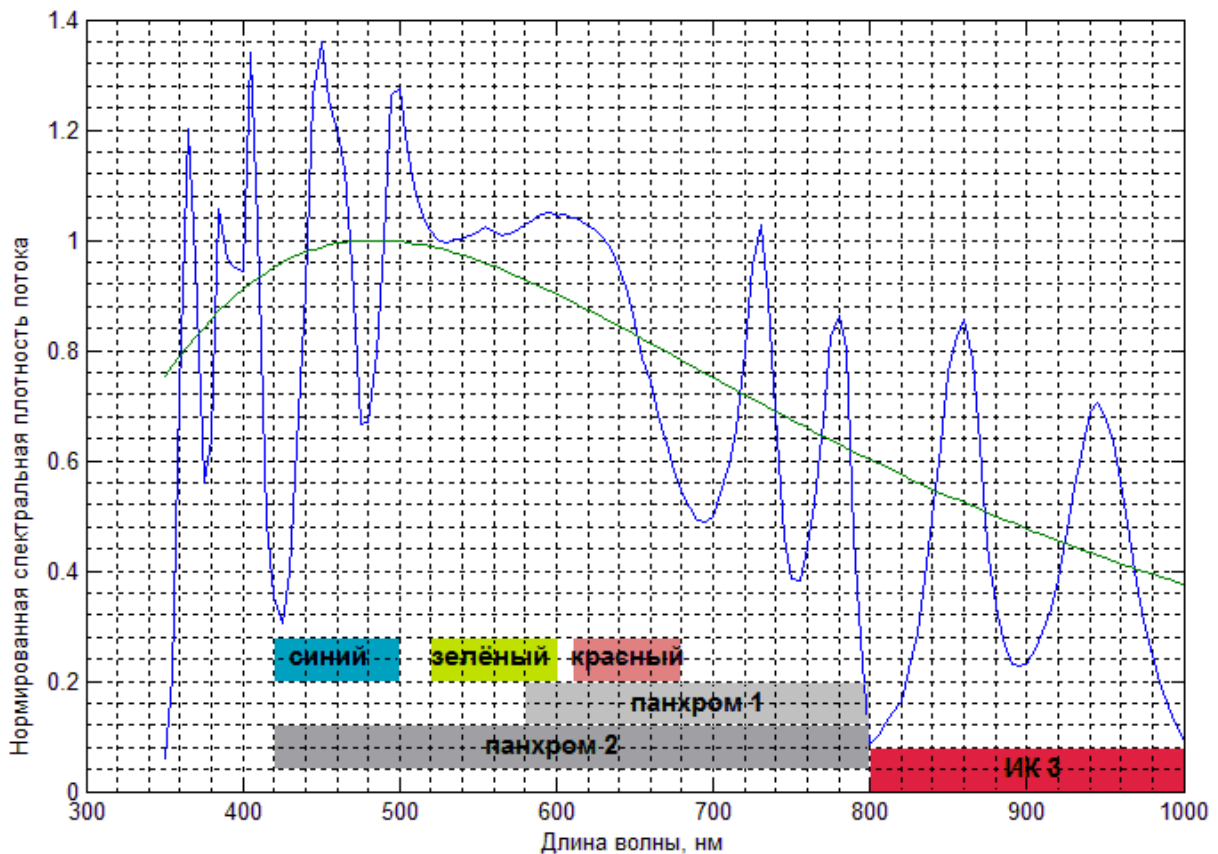


Рис. 1. Результат численного моделирования спектра УРЗ

Из рисунка (1) видно, что полученный спектр имеет ярко выраженные локальные экстремумы. Однако, для решения задачи калибровки аппаратуры ДЗЗ важно не столько видимое соответствие спектров, сколько близость коэффициентов пересчёта к 1.

Для фотоприёмника с постоянной квантовой эффективностью коэффициент пересчёта сигнала от искусственного спектра к солнечному задаётся формулой (4).

$$K_{\text{сигн}} = \frac{U_{\text{солн}}}{U_{\text{урз}}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{сол}}(\lambda) \cdot \lambda \, d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\text{урз}}(\lambda) \cdot \lambda \, d\lambda} \quad (4)$$

Где $B_{\text{сол}}(\lambda)$ и $B_{\text{урз}}(\lambda)$ – спектры Солнца и УРЗ соответственно, приведённые к размерности $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм})]$. При этом выполняется соотношение (4):

$$\int_{500}^{800} B_{\text{сол}}(\lambda) \, d\lambda = \int_{500}^{800} B_{\text{урз}}(\lambda) \, d\lambda = B_{500-800} \quad (5)$$

где:

$B_{500-800}$ – требуемая яркость светящейся поверхности УРЗ в диапазоне 500...800 нм, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$.

Результаты вычислений коэффициентов пересчёта для наиболее популярных спектральных диапазонов приведены в Таблице 1.

Таблица 1

№	Название светофильтра	Полоса пропускания, нм	Коэффициент пересчёта сигнала
1	Синий	От 420 до 500	1,08
2	Зелёный	От 520 до 600	0,93
3	Красный 1	От 610 до 680	0,99
4	Красный 2	От 670 до 700	1,00
5	Красный 3	От 700 до 730	1,44
6	ИК 1	От 720 до 800	1,07
7	ИК 2	От 800 до 900	1,35
8	ИК 3	От 800 до 1000	1,19
9	Панхром 1	От 580 до 800	1,05
10	Панхром 2	От 420 до 800	1,03

Как видно из таблицы 1, для большинства спектральных каналов, наиболее часто используемых в аппаратуре ДЗЗ, отклонение коэффициента пересчёта сигнала от 1 не превышает 10%. Это достигается за счёт взаимной компенсации «зубцов» искусственного спектра, т.к. характерная ширина спектрального канала больше ширины «зубца». Это показано на рисунке 1 на примере шести каналов. Такой погрешности вполне достаточно для решения задач калибровки оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ.

Литература

1. *Афонин В.Д., Коваленко О.Ю., Гусева Е.Д. Пильщикова Ю.А. Моделирование спектра солнечного излучения с помощью светодиодов.// Фотоника. – 2016, №2(56). – С. 72-77.*
2. *Чабан Л.Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации для картографирования геопространственных данных. Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2013. – 96 с.*