

КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ИМИТАТОРОВ

Трудно переоценить влияние солнечной радиации на процессы протекающие в природной и техногенной средах, поэтому испытаниям на воздействие солнечного излучения подвергают изделия и материалы от самых простейших до космических аппаратов и их систем [1]. Проведение испытаний в натуральных условиях часто оказывается невозможно или слишком дорого по причинам сложности поддержания одних и тех же условий при проведении серии экспериментов; работы в режиме реального времени, что неоправдано удлиняет сроки испытаний [2]. Эти трудности многократно возрастают при комбинированных воздействиях.

С другой стороны имитация как абсолютных значений плотности мощности потока солнечного излучения, так и его спектрального распределения на площади $\sim 100 \text{ см}^2$, на которой можно было бы разместить испытуемый образец, изделие или модель аппарата связано с крупными энергозатратами. Так промышленный имитатор Солнца [3] с газоразрядной ксеноновой лампой с максимальным световым диаметром 120 мм потребляет от сети 15 кВт, хотя и имеет погрешность имитации солнечного спектра $\pm 10\%$ в диапазоне длин волн 0,35...2 мкм. Конкретизация цели физического моделирования часто позволяет добиться адекватности модельной и реальной ситуации менее энергоемкими средствами.

В настоящее время можно ввести классификацию задач, каждая из которых предъявляет свои специфические требования к имитатору Солнца:

- Солнце как источник фотоиндуцируемых химических превращений [4];
- Солнце как источник радиационного нагрева [1];
- Солнце как источник фоновых помех [5];
- Солнце как маяк астронавигационных систем [6, 7];
- Солнце как источник электродвижущей силы фотопреобразователей [8];
- Солнце как источник биологически активного излучения.

Последняя проблема выходит за рамки настоящей работы.

Создание имитатора для решения любой из вошедших в классификационный список задач, как правило, не требует воссоздания солнечного спектра во всем исследованном диапазоне 0,14...300 мкм и достижения интегральной плотности потока солнечной радиации на уровне солнечной постоянной 135,5 мВт/см² [9]. Экспериментальными исследованиями механизмов фотоокрашивания покрытий с наполнителями из неорганических пигментов (Al_2O_3 , MgO , TiO_2 , PbCO_3 , ZnO и др.) доказано, что на их протекание основное влияние оказывает "жесткая" часть ультрафиолетового излучения (0,2...0,3 мкм) в световом пучке [4]. В этой спектральной области лучшим имитатором спектра Солнца является ксеноновая лампа ДКиР. Расхождение спектров Солнца и лампы ДКиР в длинноволновой области ($\geq 0,4$ мкм) несущественны в связи с ее слабой фотоактивностью. Присутствие ультрафиолетовой части спектра в пределах от 280 нм до 400 нм с плотностью потока $\leq 100 \text{ Вт/м}^2$ также необходимо и при испытаниях радиоаппаратуры [10]. В области "жесткого" ультрафиолета лампы накаливания неэффективны и вряд ли могут составить конкуренцию газоразрядным и дуговым источникам света.

В общем виде поглощенный элементарной площадкой $d\sigma_2$ квазимонохроматичный лучистый поток, создаваемый элементарной площадкой источника $d\sigma_1$ в дифференциальной форме определяется выражением:

$$d^3F_{\text{пл}} = (B_\lambda \cos\varphi_1 d\sigma_1)(\alpha_\lambda \cos\varphi_2 d\sigma_2) d\lambda / r^2, \quad (1)$$

B_λ - спектральная энергетическая яркость источника $d\sigma_1$ в направлении площадки $d\sigma_2$; α_λ - спектральный коэффициент поглощения площадки $d\sigma_2$ в направлении источника $d\sigma_1$; φ_1 - угол между радиусом-вектором, соединяющим площадки $d\sigma_1$ и $d\sigma_2$ и нормалью к изучающей площадке $d\sigma_1$; φ_2 - угол между тем же радиусом-вектором и нормалью к площадке $d\sigma_2$ [1]; r - длина радиуса-вектора.

Форма записи выражения (1) в виде произведения двух скобок удобна тем, что позволяет разделить члены, относящиеся в основном к источнику лучистого потока и к поглощающей его площадке.

Если учесть, что α_λ и B_λ зависят не только от направлений, но и состояния поляризации, что задача как теоретических, так и экспериментальных оценок поглощенного образцом лучистого потока F_n без упрощающих предположений становится сложной. Удаленность Солнца и отсутствие поляризационной составляющей в его спектре приводит к следующим упрощениям выражения (1):

$$r = \text{const}_1; \quad \varphi_1 = \text{const}_2 \quad (2)$$

$$d^2 F_{n\lambda} = \alpha_\lambda \cos \varphi_2 d\sigma_2 d\lambda \int_{S_1} \frac{B_\lambda \cos \varphi_1}{r^2} d\sigma_1 = \alpha_\lambda E_\lambda \cos \varphi_2 d\sigma_2 d\lambda, \quad (3)$$

где - S_1 - площадь поверхности Солнца;

$$E_\lambda = \int_{S_1} \frac{B_\lambda \cos \varphi_1}{r^2} d\sigma_2, \quad (4)$$

спектральная плотность энергетической освещенности, создаваемой Солнцем на расстоянии равном радиусу орбиты Земли. Значения E_λ в верхних слоях атмосферы и на поверхности Земли надежно установлены и приведены в справочной литературе [9, 12, 13].

Воссоздание E_λ в рабочей зоне является достаточным условием, предъявляемым к имитатору солнечного излучения для испытаний на радиационный нагрев, причем на диапазон 0,3...1,8 мкм приходится 90% излучаемого Солнцем потока [9]. Так же нет необходимости предъявлять жесткие требования к расходимости излучения, поскольку $\cos 15^\circ = 0,966$, и величина $d^2 F_{n\lambda}$ мало меняется даже для такого сильно расходящегося потока. В случае же слабой зависимости α_λ от λ вообще достаточно воспроизвести величину

$$E_o = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda, \quad (5)$$

на уровне солнечной постоянной без строгой идентификации спектрального распределения. Поэтому простые осветители типа софитов с галогенными лампами являются вполне удовлетворительными имитаторами.

К задаче радиационного нагрева тесно примыкают и проблемы испытаний фотопреобразователей лучистого потока в электрическую энергию, т.к. требуемые для этого интегральные плотности потоков излучения соизмеримы с солнечной постоянной. Но и здесь наиболее распространенные фотоэлементы на основе кремния эффективны лишь при освещении их светом с длинами волн от 0,4 мкм до 1,1 мкм, достигая максимума коэффициента преобразования на 1 мкм [8]. В спектральном диапазоне 0,4...1,1 мкм интегральная энергетическая освещенность составляет уже не 135,5 мВт/см², а 91,2 мВт/см², а с учетом поглощения в слое атмосферы и того меньше. Поскольку электродвижущая сила фотоэлемента также изменяется по закону \cos^2 от угла падения света, то жесткие требования к расходимости излучения не предъявляются. Максимум спектральной плотности силы излучения галогенных ламп накаливания приходится на область 1...1,2 мкм [4], что согласуется с максимумом коэффициента преобразования кремниевых фотоэлементов. Таким образом, имитатор Солнца с простыми в эксплуатации лампами накаливания в качестве источника излучения будет иметь характеристики, близкие к оптимальным.

При проверке астронавигационных приборов имитатор должен воспроизводить заданный уровень превышения сигнала над фоном в области спектральной чувствительности датчика и, для датчиков точной ориентации [7], угловые размеры Солнца (32 угл.мин) [15]. Чувствительными элементами датчиков служат кремниевые, германиевые или сернисто-кадмиевые фотодиоды и фотосопротивления. Максимум их спектральной чувствительности лежит в видимом или ближнем ИК диапазоне. Часто в датчиках Солнца с помощью красных и нейтральных светофильтров осуществляется амплитудная селекция излучения по мощности и спектру. Следовательно спектральное согласование имитатора с датчиком Солнца требуется лишь в относительно узкой области, а величина интегрального светового потока в согласованном интервале длин волн уменьшена на величину ослабления вносимого нейтральным светофильтром, естественно с одновременным его выведением из оптического тракта. Компактность тела накала малогабаритных галогенных ламп типа КГ-12х100 и КГ-24х150 [16] обеспечивает малые угловые размеры источника излучения.

Солнце как источник фоновых помех для оптико-электронных приборов активного типа с лазерными излучателями и спектральной селекцией отраженных сигналов можно имитировать теми или аналогичными лазерными излучателями с формирующей оптикой и ослабителями, чтобы получить уровни фоновых освещенностей на модели или ее части в соответствии с полосой пропускания ОЭП. При узкой 1...10 нм полосе пропускания эти уровни невелики и легко достижимы. От экспериментатора требуется лишь воспроизведение угловых положений в системе: имитатор - модель - ОЭП.

Для ОЭП пассивного типа, работающих по отраженному объектом солнечному излучению или собственному тепловому, важно соблюсти подобие спектральных распределений Солнца и имитатора, достижение же интегральной энергетической освещенностью значения солнечной постоянной не является обязательным условием. Основные параметры ОЭП - вероятности обнаружения и ложных тревог зависят от отношения сигнал/шум [5], обеспечение которого и является необходимым условием адекватности модельной ситуации и реальности. Часто достаточно отношение сигнал/шум 5...10. В лабораторных же условиях помехи могут составлять в среднем доли фотона за цикл измерения. Однако уменьшение интегральной энергетической освещенности может привести к трансформации статистики фотоотчетов от нормального распределения для сильного сигнала через различные промежуточные к пуассоновской [17]. Оценочные уровни смены статистик: ≥ 100 фотоотчетов за цикл измерения - нормальная, ≤ 10 - пуассоновская, 10...100 - промежуточная, которая определяется источником излучения, средой распространения и самим ОЭП и, как правило, нуждается в самостоятельном исследовании. Поскольку спектр излучения Солнца довольно точно аппроксимируется черным телом [18], как и излучение галогенных ламп [14], то и в этом случае, как будет показано ниже соответствующим подбором светофильтров излучение галогенной лампы приводится к цветовой температуре Солнца в требуемой спектральной области.

Схемы построения излучателей имитаторов Солнца аналогичны оптическим схемам проекционных приборов [15, 19]: источник света, конденсор, объектив (см.рис.1). Назначение конденсора - собрать как можно большую долю светового потока источника в фокальной плоскости объектива, а объектива - задать требуемую расходимость. Корректирующий светофильтр приближает спектральное распределение источника света к солнечному в заданной области спектра.

Как было показано, для решения нескольких классов задач перспективно использование в качестве источника света имитатора Солнца галогенных ламп накаливания. Их цветовая температура в рабочей области изменяется по линейному закону в зависимости от протекающего через них тока от 1900 до 3500 К [14], поэтому ток лампы имитатора необходимо стабилизировать электронными средствами, что и отражено на схеме (рис.1). Поскольку Солнце и галогенная лампа моделируются абсолютно черными телами с цветовыми температурами T_1 и T_2 соответственно, то относительные распределения энергии их излучения по длинам волн описываются функцией [20]:

$$y_{1,2}(x_{\lambda_{1,2}}) = 142,32 x_{\lambda_{1,2}}^{-5} (e^{\frac{4,9651}{x_{\lambda_{1,2}}}} - 1)^{-1}, \quad (6)$$

где индекс 1 относится к Солнцу, а индекс 2 к лампе:

$$x_{\lambda,1,2} = \lambda / \lambda_{m,1,2},$$

λ - длина волны; $\lambda_{m,1,2}$ - длина волны излучения абсолютно черного тела в максимуме и вычисляется по закону Вина:

$$\lambda_{m,1,2} = c / T_{1,2}, \quad (7)$$

где $c = 2897,8$ мкм \cdot К - постоянная Вина.

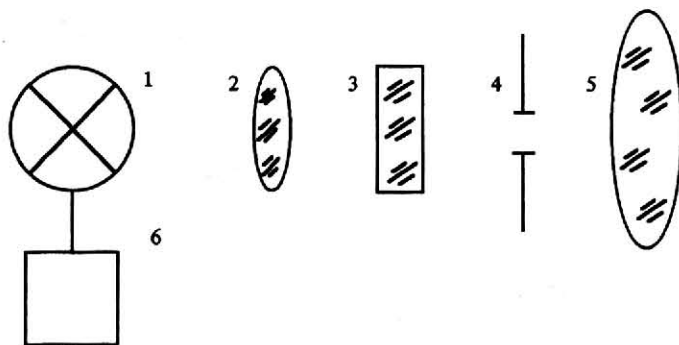


Рис.1. Схема имитатора Солнца

1 - источник света; 2 - конденсор; 3 - корректирующий светофильтр; 4 - регулируемая диафрагма; 5 - объектив; 6 - стабилизатор тока.

В абсолютных единицах, спектральное распределение энергетической освещенности примет вид:

$$E_{\lambda,1,2} = c_{1,2} E_{1,2} y_{1,2}(x_{\lambda,1,2}), \quad (8)$$

где E_1 - интегральная энергетическая освещенность (солнечная постоянная), E_2 - интегральная энергетическая освещенность, которую создает галогенная лампа; $c_{1,2}$ - нормирующий множитель, имеющий размерность λ^{-1} . Он вычисляется из условия:

$$E_{1,2} = \int_0^{\infty} E_{\lambda,1,2} d\lambda, \quad (9)$$

и для абсолютно черного тела определяется простым выражением:

$$c_{1,2} = 0,657568 / \lambda_{m,1,2} \quad (10)$$

Коэффициент пропускания корректирующего светофильтра T_{λ} , трансформирующего спектр лампы $E_{\lambda,2}$ в спектр подобный солнечному $kE_{\lambda,1}$ в некотором диапазоне (см.рис.2), является решением уравнения:

$$kE_{\lambda,1} = T_{\lambda} E_{\lambda,2}, \quad (11)$$

откуда

$$T_{\lambda} = kE_{\lambda,1} / E_{\lambda,2}, \quad (12)$$

где k - коэффициент пропорциональности.

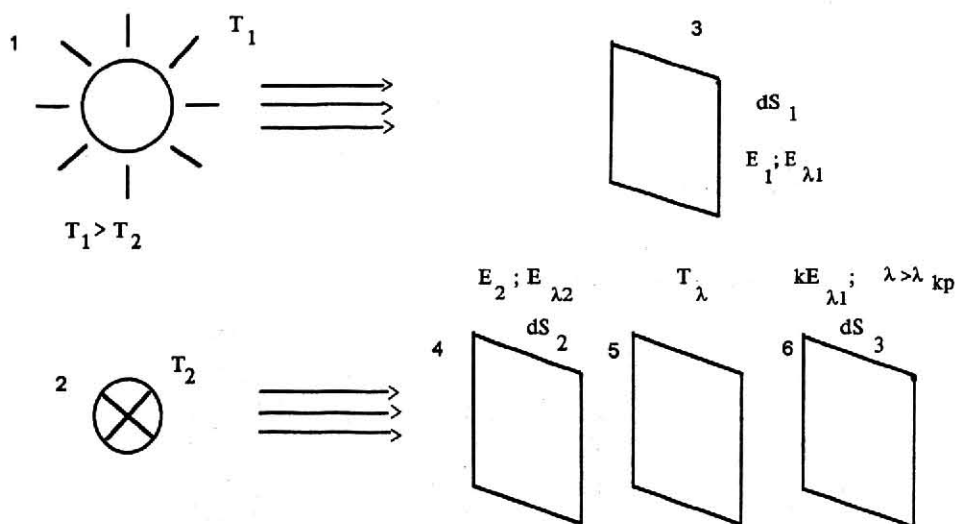


Рис.2. К расчету корректирующего светофильтра
 1 - Солнце с цветовой температурой T_1 ; 2 - лампа с цветовой температурой T_2 ; 3,4,6 - элементарные площадки; 5 - корректирующий светофильтр.

Подставив в (12) выражение для $E_{\lambda,1,2}$ (8), получим:

$$T_{\lambda} = \frac{kE_1 \left(\frac{\lambda_{m1}}{\lambda_{m2}} \right)^4 \left(e^{4,9651 \frac{\lambda_{m2}}{\lambda}} - 1 \right)}{E_2 \left(\frac{\lambda_{m1}}{\lambda_{m2}} \right)^4 \left(e^{4,9651 \frac{\lambda_{m1}}{\lambda}} - 1 \right)} \quad (13)$$

Если в решении (13) $T_2 > T_1$, то $\lambda_{m2} > \lambda_{m1}$, т.е. $\lambda_{m1}/\lambda_{m2} > 1$ и соответствующим подбором величин k и E_2 можно получить полную идентичность спектрального распределения имитатора и Солнца в любом спектральном диапазоне $0 < \lambda < \infty$ с помощью пассивного светофильтра, т.к. $T_{\lambda} \leq 1$ для всех $0 < \lambda < \infty$.

Поскольку цветовая температура Солнца выше чем у галогенных ламп ($T_2 < T_1$ и $\lambda_{m1}/\lambda_{m2} < 1$ и полная идентификация спектров с помощью корректировок пассивным ($T_{\lambda} \leq 1$) светофильтром невозможна в полном соответствии со вторым началом термодинамики. Тем не менее в ограниченной области спектра для длин волн больше некоторой критической $\lambda_{кр}$ точное воспроизведение спектрального распределения излучения Солнца достижимо.

Значение $\lambda_{кр}$ находится из условия $T_{\lambda} = 1$:

$$\frac{kE_1 \left(\frac{\lambda_{m1}}{\lambda_{m2}} \right)^4 \left(e^{4,9651 \frac{\lambda_{m2}}{\lambda_{кр}}} - 1 \right)}{E_2 \left(\frac{\lambda_{m1}}{\lambda_{m2}} \right)^4 \left(e^{4,9651 \frac{\lambda_{m1}}{\lambda_{кр}}} - 1 \right)} = 1. \quad (14)$$

Из-за трансцендентности уравнения (14) доказательство существования его решения следует из рассуждений качественного характера. При $T_2 < T_1$, $\lambda_{m2} > \lambda_{m1}$ наиболее быстрорастущей частью выражения (13) с уменьшением λ является числитель

$$\left(e^{4,9651} \right)^{\frac{\lambda_{m2}}{\lambda}} - 1. \quad (15)$$

Поэтому, если для больших $\lambda > \lambda_{кр}$ удастся подобрать k и E_2 , чтобы $T_\lambda < 1$, то по достижении $\lambda = \lambda_{кр}$ с уменьшением λ сначала достигается равенство $T_\lambda = 1$, а затем и $T_\lambda > 1$, когда пассивный фильтр становится физически нереализуем.

В заключение следует отметить перспективность использования импульсных излучателей для создания имитаторов Солнца как источника фоновых помех, маяков и электродвижущей силы, особенно при решении задач, связанных с получением интегральных плотностей мощности потока на уровне солнечной постоянной или выше. Здесь наряду с изложенными выше требованиями по уровням энергетической освещенности, спектральным распределениям и расходимости, следует наложить еще естественное ограничение на длительность импульса имитатора τ_u . τ_u должна быть больше характерного для конкретных испытаний промежутка времени τ_o , в качестве которого может выступать время сбора первичной информации датчиков, например время записи в ЭВМ кадра телевизионного изображения, постоянная времени датчика Солнца или солнечной батареи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды./ Под ред. Г.И.Петрова.- М.: Машиностроение, 1971. -382 с.
2. Петров В.П. Контроль качества и испытание оптических приборов.- Л.: Машиностроение, 1985. -222 с.
3. Дубиновский А.М., Панков Э.Д. Стендовые испытания и регулировка оптико-электронных приборов. - Л.: Машиностроение, 1986. -152 с.
4. Войцены В.С., Гужова С.К., Титов В.И. Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. - М.: Энергоатомиздат, 1991. -224 с.
5. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Инфрокрасные лазерные локационные системы. - М.: Воениздат, 1987. -175 с.
6. Сафронов Ю.П., Андриянов Ю.Г. Инфрокрасная техника и космос. - М.: Сов.радио, 1978. -248 с.
7. Ивандиков Я.М. Оптико-электронные приборы для ориентации и навигации космических аппаратов. - М.: Машиностроение, 1971. -200 с.
8. Колтун М.М. Солнечные элементы. - М.: Наука, 1987. -192 с.
9. Макарова Е.А., Харитонов А.В. Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная. - М.: Наука, 1972. -288 с.
10. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС. - М.: Высш.шк., 1991. -336 с.
11. Гуревич М.М. Введение в фотометрию. - М.: Энергия, 1968. -244 с.
12. Околоземное космическое пространство: Справочные данные/Под ред.Ф.С.Джонсона. - М.: Мир, 1966. -191 с.
13. Инженерный справочник по космической технике/Под ред.А.В.Солодова. - М.: Воениздат. 1977. -430 с.
14. Сидоров С.Н., Смолкин М.Н., Никитичева А.М. Интегральные и спектральные характеристики галогенных ламп накаливания. ОМП, 1976, N 2, стр.79-80.
15. Тельный А.А. Имитация солнечного излучения в лабораторных условиях. ОМП, 1976, N 5, стр.43-46.
16. Вугман С.М., Волков В.И. Галогенные лампы накаливания. - М.: Энергия, 1980. -136с.

17. *Стонога В.А., Лагутин М.Ф.* Исследование статистики фотоотчетов реального локационного канала. - Тез.докл. IV Всесоюзн. симп. по лазерному зондированию атмосферы. - Томск: изд-во Ин-та оптики атмосфер СО АН СССР, 1976, стр.182-183.
18. *Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И.* Курс общей астрономии. - М.: Наука, 1970. -536 с.
19. *Вычислительная оптика: справочник/Под ред. М.М.Русинова.* - Л.: Машиностроение, 1984. -423 с.
20. *Криксунов Л.З.* Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Сов.радио, 1978. -400 с.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

При подготовке статей в сборник "Компьютерная оптика" просим руководствоваться следующими правилами:

1. Материал должен быть изложен лаконично и ясно, окончательно отработан. Текст должен представляться в двух экземплярах (один из которых - первый машинописный оттиск) на русском или английском языках.

2. Рукопись должна быть напечатана через два интервала на одной стороне листа формата А4. Объем статей и обзоров для публикации в сборнике, как правило, не должен превышать 24 страниц машинописного текста, кратких сообщений - 10 страниц.

3. К статье (обзору) должна быть приложена аннотация на русском и английском языках.

4. Формулы вписываются крупно и отчетливо. Заглавные и строчные буквы, отличающиеся только своими размерами, подчеркиваются карандашом двумя чертами: заглавные - снизу, строчные - сверху. Ноль не подчеркивается. Греческие буквы обводят кружком красным карандашом, знаки математических операций (например, дифференцирования и интегрирования) - зеленым. Употребление специальных букв и символов следует оговаривать на полях рукописи. Индексы и показатели степени следует писать четко ниже или выше строки и отчеркивать дугами карандашом. Латинские буквы в тексте обводят кружком синим карандашом.

5. Иллюстративный и графический материал должен быть пронумерован и выполнен в виде, пригодном для полиграфического воспроизводства. К рисункам (при необходимости) отдельно даются подрисуночные тексты.

6. Страницы рукописи должны быть пронумерованы. На полях следует указать места размещения рисунков, графического материала и таблиц.

7. В список литературы следует включать все использованные источники, снабжая их порядковой нумерацией. Библиографические описания источников должны располагаться в списке в порядке появления ссылок в тексте. При ссылках на источник в тексте указывается номер по списку в квадратных скобках.

8. Рукопись должна быть обязательно подписана автором, а при наличии нескольких авторов - всеми соавторами. Статьи, являющиеся результатом работ, проведенных в организациях, должны обязательно сопровождаться письмами этих организаций.

9. Необходимо указать фамилию, полное имя и отчество каждого соавтора, ученую степень, ученое звание, должность, организацию, страну, точный адрес и номер телефона.

10. Для публикации в сборнике принимаются только открытые материалы.