

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СРАВНЕНИЯ ПРИ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ

© 2010 г. А. С. Сакян, канд. техн. наук; Н. В. Сидоровский; А. Н. Старченко, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: contact@niiki.ru

В работе рассмотрены вопросы проведения натурных измерений оптических характеристик объектов и сцен методом сравнения, в том числе при активной подсветке, особенности практической реализации метода, а также базовые аспекты создания и метрологического обеспечения мер сравнения.

Ключевые слова: коэффициент яркости, эффективная площадь рассеяния, показатель световозвращения, метод сравнения, мера сравнения, световозвращатель, зеркальная сфера.

Коды OCIS: 120.0120

Поступила в редакцию 08.10.2009

Измерение оптических характеристик объектов и сцен в натурных условиях представляет собой достаточно сложную задачу, которая требует применения специальной аппаратуры и сопряжена с необходимостью текущего контроля параметров, входящих в расчетные соотношения. Типовыми являются задачи измерения коэффициентов яркости (КЯ) протяженных объектов и эффективной площади рассеяния (ЭПР) компактных объектов. Негативное влияние на достоверность результатов дистанционных измерений оказывают вариации пропускания атмосферы, изменения естественной освещенности и невысокие уровни сигналов от удаленных объектов.

Применение метода сравнения позволяет минимизировать влияние возмущающих факторов, повысить точность и упростить процедуру измерений. Необходимым условием реализации метода является наличие подходящей меры сравнения. Следует отметить, что в России отсутствуют стандартные поверочные схемы для средств измерения КЯ и ЭПР. По этой причине с помощью ряда дополнительных обоснований приходится осуществлять привязку создаваемых мер сравнения к государственным эталонам направленного и диффузного отражения [1].

Коэффициент яркости β в соответствии с определением [2] представляет собой отношение яркости реальной поверхности к яркости идеального рассеивателя с изотропной индикаторной и полусферическим коэффициентом отражения,

равным единице, при одинаковых условиях освещения и наблюдения. Различают коэффициенты визуальной яркости β_v применительно к области чувствительности глаза человека и энергетической яркости β_e применительно к определенной длине волны или спектральному интервалу. КЯ обычных материалов и покрытий имеют значения от 0,01 до 1. КЯ на уровне 0,01 у черной матовой краски и сажевых покрытий. У специальных пленок и покрытий (светоотражающие дорожные знаки и др.) значения КЯ при направленной подсветке составляют 10–30. Отраженное ими излучение сосредоточено в небольшом телесном угле в направлении облучения.

КЯ могут измеряться как при естественной, так и при искусственной подсветке. В обоих случаях для получения опорного сигнала применяется мера сравнения с известным коэффициентом яркости β_0 . Величина β нужного фрагмента находится по формуле

$$\beta = \beta_0(U/U_0), \quad (1)$$

здесь U – сигнал при наблюдении исследуемого фрагмента, U_0 – сигнал при наблюдении меры сравнения.

С учетом пределов вариации КЯ диапазон линейной работы приемного канала измерительной аппаратуры должен быть не менее 1000. В ходе измерений КЯ следует соблюдать ряд условий. При естественной подсветке поле зрения приемного канала должно быть меньше углового размера меры сравнения и контролируемого

фрагмента. В случае активной подсветки возможны два способа выделения нужного элемента сцены. При малой расходимости пучка излучения освещается лишь нужная часть сцены или меры сравнения. В такой ситуации поле зрения приемного канала может быть достаточно большим. Наоборот, при большой расходимости пучка подсвечивается достаточно большая часть сцены. Поэтому выделение требуемого фрагмента должно обеспечиваться полем зрения приемного канала. Этот вариант на практике реализуется редко из-за неэффективного использования излучения подсветки.

Особая ситуация имеет место при измерениях с помощью многоэлементных приемников излучения. В статьях [3, 4] описаны телевизионная измерительная аппаратура и методология измерения спектрональных коэффициентов яркости с ее помощью.

В комплект этой аппаратуры вошел образцовый отражатель из молочного стекла МС 20, которое наряду со стеклами ОНС создано для фотометрических измерений [5]. Обычно отражатели из этого стекла имеют полированную поверхность. В силу этого при направленной подсветке наблюдается зеркальный блик интенсивностью около 4%. Он может попадать на приемник и приводить к существенным ошибкам из-за того, что интенсивность диффузной составляющей по мере удаления ослабевает сильнее, чем прямой блик при направленной подсветке. Поэтому отражатель с полированной поверхностью нужно наклонять на угол, превышающий расходимость пучка подсветки.

Для исключения зеркального блика предложено применять пластины из стекла МС 20 со шлифованной, а не полированной поверхностью. На рис. 1а приведены индикатрисы КЯ шлифованной пластины из стекла МС 20 на длинах волн 355, 532 и 1064 нм. Они получены при угле падения лазерного пучка, равном 5°, и подтверждают уникальные рассеивающие свойства данного молочного стекла. Однако, в силу того, что рассеяние происходит в толще материала, стекло МС 20 подходит для работы в спектральной области, где его поглощение невелико. КЯ на длинах волн 355 и 1064 нм ниже, чем на длине волны 532 нм. При освещении стекла МС 20 ультрафиолетовым (УФ) излучением с длиной волны менее 320 нм наблюдается голубое флюоресцентное свечение.

По этим причинам для измерений КЯ методом сравнения в УФ и инфракрасном диапазонах предложено использовать отражатели из листо-

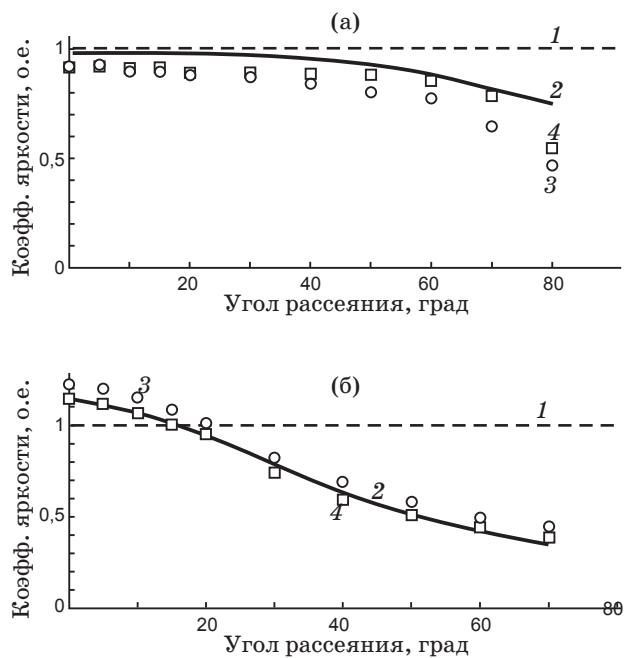


Рис. 1. Индикатрисы рассеяния отражателей из молочного стекла (а) и из шлифованного оконного стекла с зеркальным покрытием (б). 1 – индикатриса идеального рассеивателя, 2 – индикатрисы на длине волны 532 нм, 3 – значения КЯ на длине волны 355 нм, 4 – значения КЯ на длине волны 1064 нм.

вого оконного стекла. Рабочая поверхность обрабатывается абразивным порошком, применяемым для шлифовки оптических деталей. Затем на нее наносится отражающее покрытие, например, алюминий с защитным слоем из фтористого магния для УФ диапазона. На рис. 1б показаны индикатрисы КЯ такого отражателя при угле падения 5°. Из-за экранирования излучения неровностями поверхности при углах рассеяния более 20–30° КЯ снижается. С ростом длины волны индикатриса рассеяния становится более вытянутой, а КЯ при малых углах превышает 1.

На рис. 2 представлены фотографии отражателей из молочного стекла МС 20 и шлифованного витринного стекла с зеркальным покрытием. Отражатель из молочного стекла в силу малого размера заготовок содержит 9 пластинок размером 100×100 мм, наклеенных на подложку из листового стекла. Одновременно с отражателями изготавливаются свидетели диаметром 20 мм. Они используются при измерениях индикатрис рассеяния $\beta(\alpha, \theta)$ и полусферических коэффициентов отражения $\rho_{2\pi}$ на приборах с приставками диффузного и полного отражения. Значения КЯ определяются при условии равенства значения

интеграла $\int\int(1/\pi)\beta(\alpha, \theta)\sin(\theta)\cos(\theta)d\alpha d\theta$ полусферическому коэффициенту отражения $\rho_{2\pi}$. Типовая погрешность нормирования КЯ диффузных отражателей не превышает 5%.

При эксплуатации свидетели и отражатели хранятся и применяются в одинаковых условиях. Свидетели подвергаются периодическому контролю. После воздействия интенсивных атмосферных осадков проверяются и сами диффузные отражатели. При необходимости их поверхности шлифуются и покрываются новым отражающим покрытием.

Отражательные свойства компактных (точечных) объектов описываются суммарными для всей наблюдаемой поверхности показателями. Полагается, что угловой размер объекта меньше углового разрешения приемного канала, а объект целиком подсвечивается естественным или искусственным источником света. Сегодня чаще других пользуются двумя параметрами: ЭПР и показателем световозвращения (ПСВ). Параметр ЭПР заимствован из радиолокации, где применялся для описания объектов сложной формы, таких как самолеты, корабли и космические аппараты. Под ЭПР объекта (σ) понимается площадь проекции зеркальной сферы, формирующей отраженный сигнал, равный сигналу от реального объекта. Объекты с диффузной или окрашенной поверхностью имеют ЭПР от 0,1 до 10 м^2 .

Показатель световозвращения (K_{cb}) в соответствии с названием ориентирован на описа-

ние свойств уголковых и зеркально-линзовых отражателей, а также иных объектов с высокой направленностью обратного отражения. При этом предполагается, что реализуется моноспектральная схема наблюдения, когда источник подсветки и приемное устройство находятся в непосредственной близости. Базовое соотношение для ПСВ имеет вид

$$K_{\text{cb}} = I/E. \quad (2)$$

Здесь I – сила излучения в обратном направлении (на приемник), а E – облученность в плоскости объекта или отражателя.

В случае обратного отражения или рассеяния взаимосвязь показателей K_{cb} и σ описывается простой формулой (3)

$$\sigma = 4\pi K_{\text{cb}}. \quad (3)$$

Поэтому можно пользоваться любым из двух показателей. В последнее время более широко используется показатель ЭПР.

Угловые и зеркально-линзовье отражатели могут иметь ЭПР в пределах от 10^4 до 10^6 м^2 . Значение ЭПР сильно зависит от точности изготовления, поэтому ЭПР не всегда удается описать подходящим аналитическим соотношением. По этой причине актуальна задача экспериментального контроля этой характеристики.

ЭРП, также как коэффициент яркости, целесообразно определять методом сравнения по отношению сигналов, полученных при отражении излучения от контролируемого объекта U и меры сравнения U_0 с известным значением σ_0 . Ошибки минимальны, если образцы находятся на одном удалении, и время регистрации U и U_0 не велико.

До недавнего времени в качестве мер сравнения использовались диффузные щиты, шаровые сегменты (зеркальные сферы), уголковые и зеркально-линзовые отражатели [6]. ЭПР плоского щита с коэффициентом яркости β находится по формуле

$$\sigma = 4\beta A \cos\theta_1 \cos\theta_2. \quad (4)$$

Здесь θ_1, θ_2 – углы между нормалью к щиту и направлениями на источник и приемник, A – площадь поверхности щита. Для соосной геометрии наблюдения и перпендикулярного расположения поверхности щита выражение (4) преобразуется к виду

$$\sigma = 4\beta A. \quad (5)$$

Рассмотренные выше диффузные отражатели имеют ЭРП около $0,4 \text{ м}^2$.

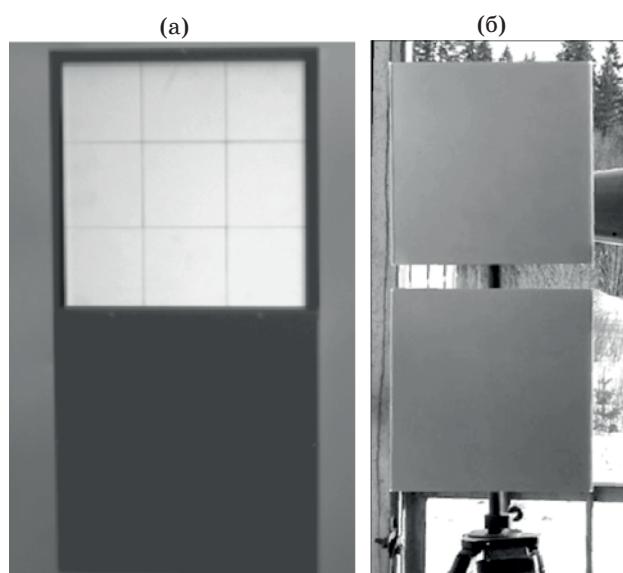


Рис. 2. Диффузные отражатели из молочного стекла МС 20 (а) и шлифованного оконного стекла с отражающим покрытием (б) размером 300×300 мм.

ЭПР зеркальной сферы рассчитывается по формуле

$$\sigma = \pi \rho r^2, \quad (6)$$

где ρ – коэффициент отражения, а r – радиус кривизны зеркальной сферы.

Для получения значения ЭПР 10^5 м^2 радиус кривизны поверхности должен быть около 170 м. В этом случае необходимо точно ориентировать ось сферического зеркала в обратном направлении. Если радиус кривизны сферы во много раз меньше расстояния до объекта, то практически одинаковые ЭПР будут иметь вогнутые и выпуклые сегменты с одинаковыми радиусами кривизны. Преимущество выпуклого сегмента заключается в том, что он не формирует перетяжки в отраженном пучке. Это уменьшает флюктуации отраженного излучения, возникающие из-за попадания пыли и иных частиц в зону фокусировки. На больших расстояниях лишь малая часть поверхности зеркальной сферы возвращает излучение на приемное устройство. Поэтому качество поверхности зеркала должно быть очень высоким. Эти обстоятельства ограничивают применимость зеркальных сфер в натурных условиях.

Для преодоления этих ограничений на основе патента [7] разработан световозвращатель с изменяемой ЭПР. Его фотография приведена на рис. 3. Основными частями устройства являются линзовый объектив и диффузно отражающая пластинка, перемещаемая вдоль оптической оси. При нахождении пластиинки вблизи фокуса падающее излучение проецируется в маленькое

пятно и эффективно направляется объективом в обратном направлении. При удалении от фокальной плоскости размер пятна на пластинке увеличивается, что приводит к росту расходности отраженного пучка излучения и уменьшению ЭПР. Для задания положения отражающей пластиинки объектив имеет винтовую оправу со шкалой. Требуемая ориентация оптической оси световозвращателя осуществляется с помощью поворотного устройства и визира.

В конкретной реализации с целью обеспечения работы в широком диапазоне спектра в качестве объектива используется линза из фотристого бария. На рис. 4 приведена зависимость изменения ЭПР от смещения пластиинки на длине волны 1064 нм. Максимальная ЭПР составила около 500 м^2 , а минимальная – 1 м^2 . Аналогичные зависимости получены для длин волн 355 и 532 нм, а также на 1,54 и 10,6 мкм.

Для передачи единицы ЭПР световозвращателю применялись три сферических зеркала диаметром 60 мм с радиусами кривизны 577, 1872 и 3873 мм. Их ЭПР находились по формуле (6). Для измерения коэффициентов отражения такое же покрытие наносилось на свидетели. Значения ЭПР для пяти рабочих длин волн приведены в таблице. Погрешность паспортизации ЭПР сферических зеркал составила 2–3%. Градуировка световозвращателя по зеркальным сферам проводилась на дистанциях 200 и 500 м. Погрешность воспроизведения ЭПР оказалась менее 10% на длинах волн 355, 532, 1064 нм, 1,54 мкм и 14% на длине волны 10,6 мкм из-за большей нестабильности излучения CO₂-лазера.

Эффективность предлагаемого подхода подтверждена в рамках ряда исследований, в частности при измерениях ЭПР оптических и



Рис. 3. Перестраиваемый световозвращатель.

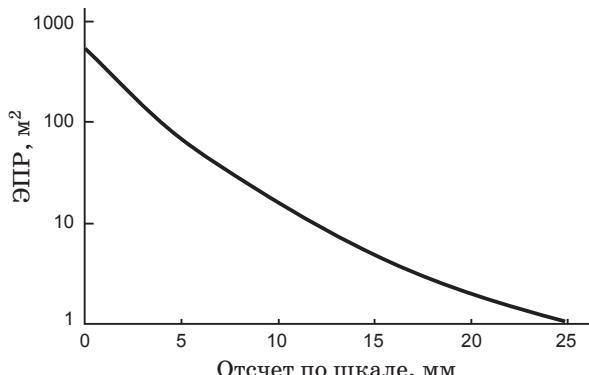


Рис. 4. Зависимость ЭПР световозвращателя от расфокусировки на длине волны 1064 нм.

Значения ЭПР сферических зеркал на лазерных длинах волн

Длина волны	ЭПР, м ²		
	ЗС-1	ЗС-10	ЗС-40
355 нм	0,972	10,23	43,8
532 нм	0,935	9,85	42,2
1064 нм	0,956	10,07	43,1
1,54 мкм	0,967	10,18	43,6
10,6 мкм	1,032	10,86	46,5

оптико-электронных приборов, сверхзвуковых объектов, включая отражение от ударно-сжатого слоя и спутного следа, а также коэффициентов яркости естественных и искусственных объектов. Применение метода сравнения в сочетании с невысокими ошибками мер КЯ и ЭПР позволяет обеспечить погрешности натурных измерений на уровне 15–25%. Рассмотренные отражатели и перестраиваемый световозвращатель применимы для измерений во всем оптическом диапазоне длин волн. Для их изготовления не требуется специального оборудования. Наиболее сложной и ответственной процедурой является паспортизация мер сравнения.

ЛИТЕРАТУРА

- ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральных, интегральных и редуцированных коэффициентов направленного пропускания в диапазоне длин волн 0,2/50 мкм, диффузного и зеркального отражений в диапазоне длин волн 0,2/20 мкм. ГОСТ 8.557-91.
- Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения, определения основных величин. ГОСТ 7601-78.
- Павлов Н.И., Прилипко А.Я., Старченко А.Н. Метод и аппаратура для получения карт коэффициентов яркости // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 6. С. 68–71.
- Зотов А.А., Павлов Н.И., Сакян А.С., Сидоровский Н.В., Старченко А.Н., Филиппов В.Г. Исследование характеристик спектрゾональной телевизионной фотометрической аппаратуры в пассивном режиме // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 2. С. 50–55.
- Каталог светорассеивающих стекол. Л.: ГОИ им. С.И. Вавилова, 1975. 58 с.
- Муратов В.Р., Филимонов Н.А. О терминологии, связанной со световозвращающим отражением // ОМП. 1980. № 3. С. 56–57.
- Ершов В.А., Сидоровский Н.В., Старченко А.Н. Световозвращатель // Патент России № 2149431. 1997.