

УДК 535.31:681

Измерение оптических характеристик катадиооптических световозвращателей

© 2019 г. **А. Д. Цветков, доктор техн. наук; О. Н. Босый;**
В. Н. Пасункин; С. Л. Потапов; Н. И. Потапова, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

E-mail: contact@niiki.ru

Поступила в редакцию 01.04.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-08-36-43

Представлена методика для определения эффективной площади рассеяния катадиооптических (зеркально-линзовых) устройств световозвращения. Приведена экспериментальная установка для измерения эффективной площади рассеяния, а также сравнительные расчётные и данные измерений по влиянию погрешностей изготовления световозвращающих элементов на их характеристики.

Ключевые слова: эффективная площадь рассеяния, световозвращение, зеркально-линзовые световозвращающие элементы, лазерное излучение, расходимость излучения.

Коды OCIS: 110.0110.

В настоящее время эффект световозвращения стал широко использоваться при решении различных прикладных задач, от измерения размеров наземных объектов и их деформаций под действием влияний различных факторов [1] до измерения параметров орбит космических аппаратов с помощью лазерной локации [2, 3].

По конструкции и принципу отражения падающего светового излучения световозвращатели делятся на два основных класса — это призмённые (трипель-призмы, уголкового отражатели) и зеркально-линзовые («кошачий глаз», линзы Люнеберга, сферические отражатели, катадиооптические) световозвращатели. Данная работа посвящена оптическим свойствам зеркально-линзовых световозвращателей (ЗЛС), их особенностям работы и влиянию на их характеристики погрешностей изготовления. Исследованиям оптических свойств световозвращающих элементов посвящён ряд работ (например, [4–7]). Также имеются работы по разработке методов и аппаратуры измерений световозвращающих характеристик оптико-электронных систем [8]. Поскольку зеркально-линзовые катадиооптические световозвращатели описываемых ниже конструкций появились сравнительно недавно [4], в настоящее время недостаточно экспериментальных данных об их свойствах

и особенностях изготовления. Кроме того, необходима разработка методики измерений и соответствующая ей установка для измерения световозвращающих свойств элементов. Этим вопросам и посвящена данная работа.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗЛС

Как было ранее описано в работах [4–6], конструкция монолитного ЗЛС (см. рис. 1) представляет собой элемент типа линзы, на заднюю поверхность которой нанесено отражающее покрытие. Элемент имеет длину по оси d и показатель преломления (ПП) материала линзы n_2 . Радиусы кривизны соответствуют следующему условию:

$$r_2 = r_1 / (n_2 - 1); \quad r_1 + r_2 = d; \quad (1)$$

где r_1, r_2 — радиусы 1-й и 2-й поверхности, 2 — диаметр входного пучка, α — угол поля зрения ЗЛС, Δ — изменение его длины по оси, данное в расчётах, D — диаметр линзы.

Соотношение данных параметров обуславливает выходные оптические характеристики ЗЛС. При конструировании выгодно, чтобы ЗЛС был возможно более компактным с большой выходной апертурой и широким полем зрения. Из формулы (1), в частности, следует, что с увеличением

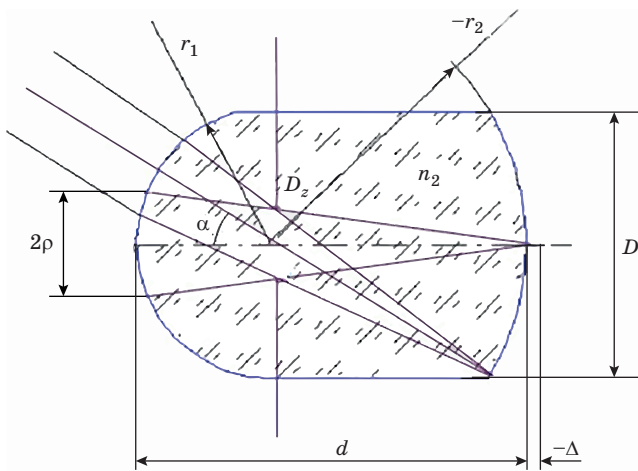


Рис. 1. Конструкция ЛЗС (обозначения в тексте).

показателя преломления (ПП) материала n_2 длина линзы d падает при выбранном радиусе кривизны r_1 . Так, например, при увеличении ПП от 1,5 до 2,0 длина ЗЛС уменьшается в 1,5 раза. Кстати, при $n_2 = 2$ $r_2 = r_1$, т.е. форма световозвращателя вырождается в шар. При расчётах необходимо принимать во внимание положение входного зрачка, расположенного на расстоянии r_1 от передней поверхности. В реальной конструкции диафрагма отсутствует и при больших полевых углах не винтитирует падающее излучение. При освещении ЗЛС пучком лучей, направленных под углом к её оси, в обратном направлении пойдёт только пучок лучей, главный луч которого проходит через точку на оси — через центр зрачка системы. При этом ограничивающим поле зрения ЗЛС будет в данной конструкции край второй линзы. Максимальный угол α_{\max} равен

$$\alpha_{\max} = \arcsin(D/2r_2). \quad (2)$$

Рассчитаем угол поля зрения ЗЛС. За начальный параметр примем радиус кривизны первой поверхности r_1 . Для максимального увеличения поля зрения выберем $D = 2r_1$. Используя формулу (1), получаем, что

$$A_{\max} = \arcsin(n_2 - 1). \quad (3)$$

Отсюда следует, что поле зрения ЗЛС зависит только от показателя преломления материала. Возьмём в качестве примера ЗЛС из стекла К8 (показатель преломления для длины волны 0,532 мкм равен 1,519158). Максимальное поле зрения будет $\alpha_{\max} = 31,5^\circ$. Очевидно, что, подбирая материал с высоким показателем преломления, можно увеличить поле зрения практически до 70° – 80° и даже выше. Ограничением могут стать только элементы конструкции.

Отражённое от края зеркальной поверхности линзы сфокусированное излучение чрезвычайно чувствительно к различного рода дефектам поверх-

ности: точкам, выколкам, дефектам покрытия, царапинам и т.д. Попадая на дефекты, излучение резко меняет свою яркость. Иногда изменение яркости отражённого пучка происходит в результате его виньетирования на элементах оправы ЗЛС. Поверхности ЗЛС сферические, поэтому основным фактором ограничения его апертуры является сферическая aberrация. В модели расчёта применена теория aberrаций 3-го порядка, которая, как показала практика, хорошо описывает оптические эффекты при работе ЗЛС.

В табл. 1 представлены результаты расчёта сферической aberrации для данных, описанных в настоящей работе (Δy_1 — расчёт по формулам 3-го порядка, $Y(0)$ — расчёт по программе SARO, $\lambda = 0,53$ мкм $n_1 = 1$, $n_2 = 1,519158$, $r_1 = 2,805$ мм, $r_2 = -5,422$ мм). Также представлен процент относительной ошибки двух методик расчёта и диаметр дифракционного пучка, соответствующего радиусу пучка ρ .

Как видно из таблицы, значения в обоих столбцах хорошо совпадают до диаметра пучка $2\rho = 2$ мм (ошибка — менее 10%). Далее, вследствие влияния aberrации высших порядков расчёт по формулам 3-го порядка становится уже неправомерным. Размер дифракционного пучка уменьшается обратно пропорционально ρ . При малых значениях радиуса пучка дифракционный диаметр в несколько раз больше его геометрического размера, рассчитанного по формулам геометрической оптики, и поэтому в дальнем поле превалирует в образовании дифракционной картины. При больших диаметрах пучка, наоборот, превалирует «линзовая» составляющая пучка над дифракционной.

Ограничением предложенной конструкции является наличие сферической aberrации, вследствие которой эффективный радиус выходного излучения при заданном поле зрения относительно небольшой. Под эффективным радиусом мы понимаем такой радиус пучка на выходе ЗЛС, который

Таблица 1. Данные расчёта сферической aberrации по формулам расчёта aberrаций 3-го порядка, а также с использованием программы SARO

ρ , мм	$\Delta y_1 \times 10^3$, мм	$Y(0) \times 10^3$ (SARO), мм	Относительная ошибка, %
0,354	1,2	1,2	0
0,433	2,21	2,3	3,9
0,500	3,41	3,5	2,5
0,707	9,63	10,1	4,6
0,866	17,7	19,0	6,8
1,00	27,2	29,8	8,7
1,41	76,4	91,8	16,7
1,73	140	186	24,7
2,0	220	322	31,6

образует при ограничении диафрагмой соответствующего диаметра в дальнем поле картину дифракции на отверстии без влияния сферической aberrации, т.е. в пределах которого волновая aberrация не превосходит $\lambda/4$. Основная длина волны, для которой рассчитывался ЗЛС, — 0,532 мкм. Но иногда для уточнения параметров ЗЛС мы использовали длину волны 1,064 мкм. Конструкция ЗЛС такова, что наиболее технологически сложным параметром является его длина по оси. Кроме того, изменением длины можно при необходимости менять структуру выходного излучения от ЗЛС, добиваясь нужной яркости отражённого излучения. Поэтому важно знать, как меняется отражающие свойства ЗЛС при изменении длины по оси.

На рис. 2 представлены данные с использованием программы расчёта оптических систем SARO эффективного радиуса пучка излучения на выходной апертуре ЗЛС при наличии поперечной сферической aberrации в зависимости от длины по оси. На этом же графике представлен расчёт угловой расходимости выходного излучения. Материал — стекло К8. Исходные данные для ЗЛС были следующие: $\lambda = 0,53$ мкм, $n_1 = 1$, $n_2 = 1,519158$, $r_1 = 2,805$, $r_2 = -5,422$, $F_2 = 8,2079$. Как видно на рисунке, при определенном значении длины ЗЛС по оси (8,155 мм) диаметр пучка начинает осциллировать. Эта точка определяет положение наибольшего эффективного диаметра пучка. Угловая расходимость выходного излучения в окрестностях точки 8,155 мм достигает при осцилляции как максимального, так и минимального значения при фиксированном значении волновой aberrации в $0,25 \lambda$. Причиной такого поведения кривых является сложный характер волнового фронта, образованного сферической aberrацией излучения, прошедшего через две сферические поверхности ЗЛС.

В работе [5] был проведён анализ осевой силы излучения вдоль оси пучка в дальней зоне при изменении диаметра пучка. На рис. 3 представлена зависимость осевой интенсивности пучка при

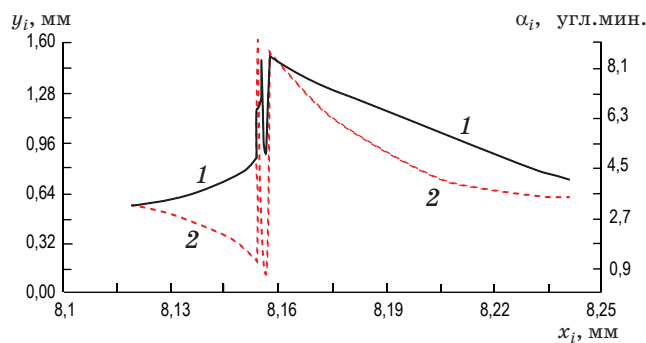


Рис. 2. Зависимость диаметра пучка с фазовой неоднородностью $\lambda/4$ (кривая 1) и соответствующая зависимость угловой расходимости (кривая 2) от длины по оси ЗЛС: ось слева — диаметр пучка в миллиметрах, ось справа — угол расходимости в угл. мин.

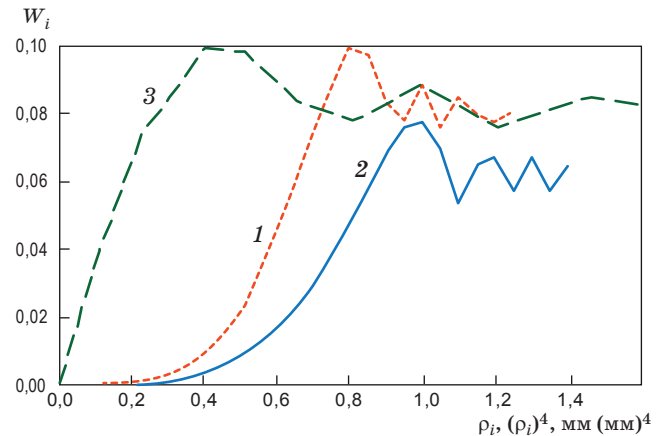


Рис. 3. Зависимость осевой интенсивности излучения в дальней зоне от радиуса ограничивающей диафрагмы пучка ρ на входе ЗЛС вдоль его длины (кривая 1 — $\lambda = 0,532$ мкм, 2 — $\lambda = 1,064$ мкм, 3 — кривая построенная в координате ρ^4).

увеличении диаметра входного/выходного зрачка ЗЛС. Как видно из рисунка, кривая 1 для малых диаметров входного зрачка имеет монотонный характер, затем при возрастании диаметра кривая приобретает осциллирующий вид, среднее значение осевой силы излучения не превышает постоянной величины 0,8. Проведённый анализ показал «аномальное» поведение кривой, говорящей о зависимости интенсивности в нулевом максимуме дифракционной картины от длины по оси световозвращателя для длины волны 0,53 мкм. Похожая кривая 2 была получена для длины волны 1,06 мкм. На основании анализа можно сделать вывод о том, что вид этой кривой зависит не только от абсолютной величины волновой aberrации в зрачке системы, а также от её формы. Кривая 3 построена в координатах $W_i(\rho^4)$. Начальный отрезок кривой имеет чётко выраженный линейный характер, что говорит о том, что осевая интенсивность изображения зависит только от квадрата площади отверстия и соответствует дифракционному качеству пучка. Дальнейший ход кривой, как видим, осциллирующий, говорит о преобладающем влиянии «линзовой» составляющей в расходимости излучения и влиянии на неё фазовой структуры пучка.

На основании полученных результатов исследования можно принять эквивалентный диаметр зрачка ЗЛС 1,5 мм. При этом диаметре входного/выходного пучка практически отсутствует сферическая aberrация, и изображение в дальнем поле соответствует дифракции на отверстии.

РАСЧЁТ СВЕТОВОЗВРАЩАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЛС

Основным параметром, отражающим качественную и количественную характеристику световозвращателя, является ЭПР — эффективная площадь

рассеяния. В приложении к лазерным локационным и дальномерным задачам эту характеристику понимают как однопозиционную моностатическую ЭПР. Вследствие того, что подавляющее количество наземных и воздушных объектов имеет матовые покрытия, рассеяние лазерного излучения происходит в основном назад к источнику в переднюю полусферу. Поляризационные явления, влияющие на ЭПР измеряемых тел, не учитываются по причине неопределённости ориентации этих тел по отношению к плоскости поляризации источника излучения и малости этих влияний. Известно, что единственным телом, идеально рассеивающее излучение в 4π , является зеркальная сферическая поверхность, а идеальным диффузным отражателем, рассеивающим падающее излучение в 2π радиан, является ламбертовская поверхность. Количественной мерой отражённого в направлении приёмной апертуры электромагнитного излучения в первом случае называют эффективную поверхность (площадь) рассеяния (ЭПР) и обозначают σ , во втором случае — эффективной отражающей поверхностью (ЭОП). Эти поверхности при практических измерениях часто являются эталонами ЭПР или ЭОП, т.к. легко поддаются расчётам и просты в изготовлении.

При проведении измерений отражательных характеристик различных тел, например в задачах дальнометрии, могут встретиться различные случаи использования эталонов и видов распределений излучений. Например, часто используется плоская матовая пластина в виде диска с диффузным ламбертовским отражением, облучаемая лазерным излучением (которое может быть как многомодовым, так и одномодовым) с гауссовым распределением по апертуре. Падающее на эталон излучение по размеру пятна засветки меньше или равно размеру эталона. В этом случае индикатриса рассеянного излучения не зависит от распределения интенсивности, а зависит только от полной мощности излучения. Другой типичный случай связан с использованием зеркальной сферической поверхности. В том случае, если излучение с равномерной интенсивностью освещает полную зеркальную сферу, интенсивность излучения на расстоянии L много больше a равна $I_L = W/4\pi L^2$, где L — расстояние от эталона (тела) до входной апертуры приёмного канала, a — радиус сферы, W — энергия (мощность) излучения. Полная энергия, падающая на сферу, — W , доля энергии, отражённой от сферы, — WR , где R — коэффициент отражения сферического эталона. ЭПР по определению равна $\sigma = 4\pi L^2 I_L / I_0$, где I_0 — интенсивность излучения вблизи освещаемого тела. Если сферическая поверхность освещается лазерным излучением не полностью, а частично, т.е. освещается центральная приосевая часть, и имеет гауссово распределение, то распределение интенсивности

излучения будет находиться в передней полусфере с радиусом L и также будет гауссовским. Тогда ЭПР равна $\sigma = 2\pi L^2 I_r / I_0$. Радиус пучка на уровне $1/e^2$ обозначим ρ_n . Связь площади поверхности на радиусе L и параметрами сферы и радиуса пучка определяется следующим образом:

$$S = 4\pi L^2 \rho_n^2 / a^2. \quad (3)$$

Площадь, освещённая лазерным пучком части сферы, равна $s = \pi \rho_n^2$. Отношение малой площади к большой площади сферической поверхности равняется

$$s/S = a^2 / 4L^2. \quad (4)$$

ЭПР определяется как отношение интенсивности рассеянного телом потока, падающего на апертуру приёмника, к интенсивности падающего на тело излучения со стороны излучателя. На практике при измерениях ЭПР часто измеряют полную энергию или мощность лазерного пучка на выходе источника, а в расчёте ЭПР используется плотность излучения в центре гауссова распределения. Поэтому для расчёта плотности энергии I_0 (мощности) в центре дифракционной картины на оси пучка можно использовать формулу (5) [6]. Для пучка, аппроксимированного гауссовой функцией, $I(r) = I_0 [\exp(-2(r/\rho_n)^2)]$, где $I(r)$ — плотность энергии пучка, I_0 — плотность энергии в центре пучка, r — текущая координата радиуса пучка, ρ_n — радиус пучка на уровне $1/e^2$, W — полная измеренная энергия. Интенсивность в центре на оси пучка, падающего на сферическую поверхность, равна

$$I_0 = 2W / \pi \rho_n^2. \quad (5)$$

Интенсивность отражённого от сферической поверхности пучка вблизи приёмника с учётом (4) и (5)

$$I_r = WRa^2 / \pi L^2 \rho_n^2. \quad (6)$$

Отсюда, ЭПР сферической поверхности, по её определению, равна

$$\sigma_{sf} = 2\pi L^2 I_r / I_0 = \pi a^2 R. \quad (7)$$

Эта формула получена для расчёта ЭПР сферической поверхности в моностатическом режиме при падении на неё гауссова пучка с диаметром, много меньше радиуса сферы. Если при равномерной засветке в моностатическом и бистатическом режимах формулы для расчёта ЭПР сферы совпадают, то при гауссовом распределении интенсивности освещающего пучка на дистанции L в бистатическом режиме формулы будут отличаться. Поскольку этот вопрос не соответствует содержанию данной статьи, то останавливаться на нём мы не будем.

Сферическая поверхность работает как эталон ЭПР, а измеряемым образцом является ЗЛС. Для достижения более высокой точности измере-

ния необходимо, чтобы ЭПР эталона была близка к ЭПР образца. Найдём величину ЭПР ЗЛС. Эквивалентный диаметр зрачка ЗЛС, как выяснили выше, — 1,5 мм. Выходное излучение ЗЛС можно представить как отражённое от плоского зеркала $d_e = 1,5$ мм, нормально расположенного к падающему излучению. ЭПР плоской круглой пластины [9] равна

$$\sigma_{pl} = \pi^3 R_1 d_e^4 / 4\lambda^2, \quad (8)$$

отсюда

$$a \approx \pi(R_1/R)^{0,5} d_e^2 / 2\lambda, \quad (9)$$

где a — радиус сферической эталонной поверхности, R — коэффициент отражения сферической поверхности для данной длины волны, R_1 — коэффициент отражения от задней поверхности ЗЛС или тоже от плоской поверхности зеркала. Нами для измерений были выбраны радиусы эталонных сферических зеркал с $a = 184,5$ мм, 406,6 мм и 557,2 мм. Оценочный расчёт по приведённой формуле (9) показывает, что при $R \approx 1$ и $R_1 \approx 0,04$ (поверхность ЗЛС без покрытия) радиус кривизны эталонного зеркала получается 266 мм, что является средней величиной выбранного диапазона радиусов зеркал.

Для более точного расчёта ЭПР ЗЛС можно использовать следующую формулу [6]:

$$\sigma(a) = \frac{8\pi^3}{\lambda^2 \times 10^6} \times \left\| \int_0^{y_0} R \exp \left[ik \left[\xi(\alpha) \frac{y^2}{2F^2} + S_1 \frac{y^4}{8n_2} \right] \right] J_0(x(y_2 - \gamma(\alpha)z)) y dy \right\|^2, \quad (8)$$

$$\gamma(\alpha) = \frac{2(r_2 - r_3)(n_2 - n_1)}{r_7 r_3} \times \sin(\alpha) [(r_2 - r_3) \cos(\alpha) + r_3].$$

В формуле (8) $\xi(\alpha)$ — величина изменения положения плоскости фокусировки пучка, прошедшего первую поверхность относительно гауссовой плоскости, от угла поворота α ; y_2 — координата в плоскости изображения; F — фокусное расстояние; $J_0(x(y_2 - \gamma(\alpha)z))$ — функция Бесселя нулевого порядка; S_1 — первая сумма Зейделя, R — коэффициент отражения от задней поверхности ЗЛС, 10^6 — коэффициент размерности, k — волновое число, y — текущая координата, n_2 — показатель преломления материала ЗЛС, λ — длина волны, $x(y_2) = ky_2/z$, z — длина трассы от ЗЛС до приёмника; $\gamma(\alpha)z$ — поперечное смещение картины дифракции в дальней зоне в зависимости от угла α .

Эта формула позволяет рассчитать ЭПР ЗЛС и провести анализ влияния различных видов и величин ошибок изготовления.

ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭПР ЗЛС

На рис. 4 представлена схема установки для измерения ЭПР зеркально-линзовых световозвращателей. Лазерная установка включает источник лазерного излучения для длины волны $\lambda = 0,53$ мкм 1, источник лазерного излучения для длины волны $\lambda = 1,06$ мкм 2, зеркало обратного хода пучка 3,

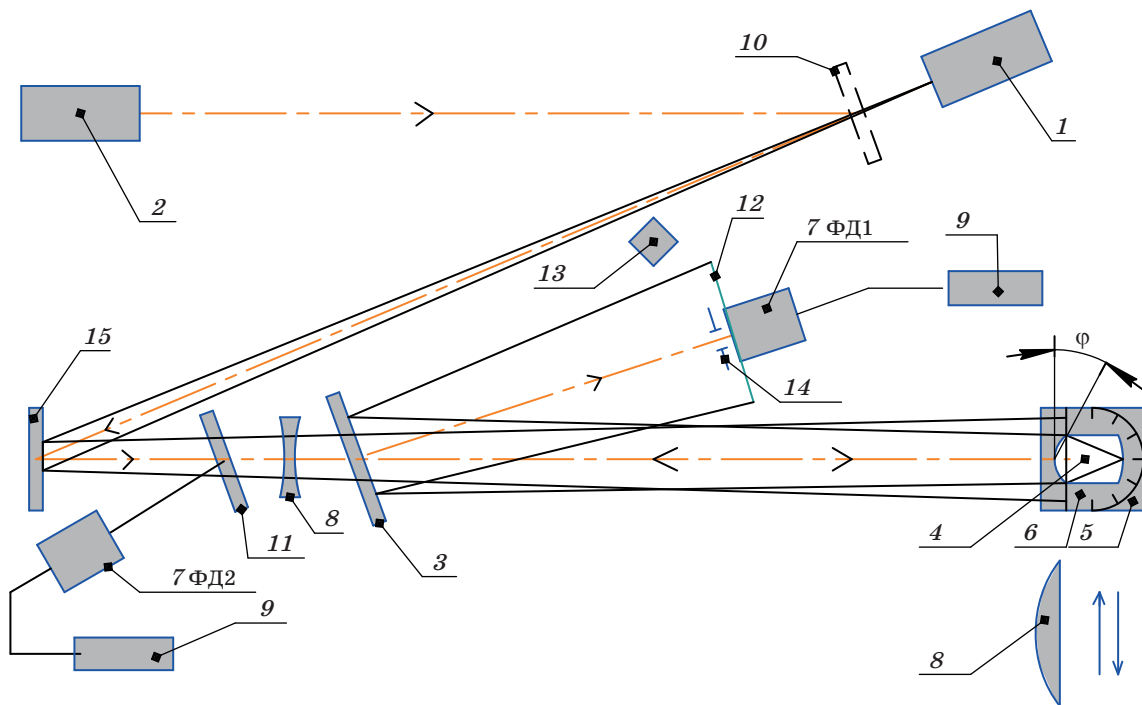


Рис. 4. Схема лабораторной лазерной установки для измерения ЭПР световозвращателей.

испытываемый образец ЗЛС 4, поворотный столик 5, юстировочные элементы 6, фотоприёмники 7 с электронным блоком, эталонную сферу 8, регистрирующее устройство 9, вводимое в схему зеркало 10 с $R = 98,5\%$ для измерения ЭПР на длине волны 1,064 мкм, ответвитель пучка излучения 11 в измерительный канал, экран 12, цифровую фотокамеру 13 с устройством обработки информации, диафрагму 14, поворотное зеркало 15 с $R_1 = 50\%$ для $\lambda = 0,53$ мкм и $R_2 = 50\%$ для $\lambda = 1,06$ мкм.

Лазерная установка работает следующим образом. Одномодовое лазерное излучение источника 1 освещает испытываемый образец ЗЛС. На пути излучения находится поворотное зеркало 15, отражающее обе длины волны с $R \leq 100\%$, ответвитель 11 пучка в измерительный канал и зеркало 3 обратного хода пучка. Излучение попадает на входную апертуру ЗЛС, закреплённого на поворотном столике 5 с помощью юстировочных элементов 6. Столик с образцом ЗЛС имеет возможность вращаться с помощью шагового двигателя вокруг вертикальной оси, проходящей через центр кривизны обеих сферических поверхностей ЗЛС, на угол более $\alpha = \pm 30^\circ$ с шагом $0,5^\circ$. Отражаясь от ЗЛС в обратном направлении, излучение попадает на экран 12 для визуального наблюдения и диафрагму 14, за которой расположен фотоприёмник 7 с регистрирующим устройством 9. Также посредством ответвителя 11 регистрируется входная мощность излучения опорного сигнала. При необходимости измерения ЭПР на длине волны 1,06 мкм в схему вводится ещё одно зеркало 10 с источником 2. Иногда для фиксации и обработки изображения используется цифровая фотокамера 13 с устройством обработки информации. Для получения числовых значений ЭПР используется эталонная сфера 8, которая периодически вводится вместо образца ЗЛС.

При создании установки к ней были выработаны требования, заключающиеся в следующих пунктах: 1) выбор оптимальных расстояний от источника излучения до испытываемого образца и от образца до экрана, 2) выбор оптимального диаметра диафрагмы в экране 12 перед фотоприёмником, 3) выбор радиуса кривизны и коэффициент отражения эталона световозвращателя. Все эти вопросы отражены в методике проверки и испытаний зеркально-линзовых световозвращателей ЗЛС «Методика измерений эффективной площади рассеяния оптических отражающих элементов МИ - 42.01/2015». Методика была утверждена в установленном порядке во ФГУП «ВНИИОФИ» (свидетельство об аттестации № 13/27.05-01.00276-2014 от 27.05.2015).

Для представленной схемы установки параметры расстояний выбраны следующие: диаметр выходного излучения лазерного пучка — 1,0 мм, длина трассы от излучателя до ЗЛС — 7,9 м, диа-

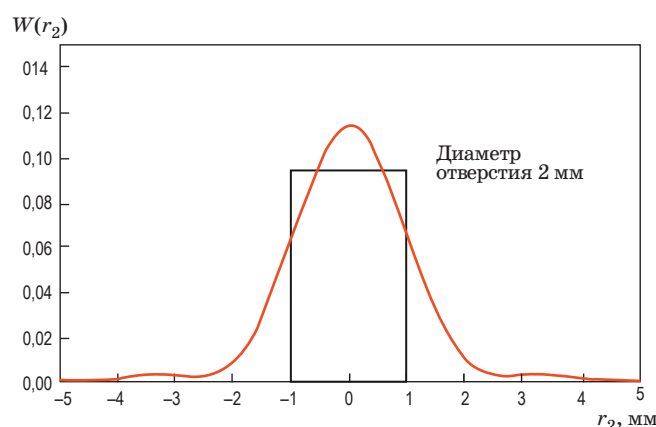


Рис. 5. Распределение излучения, отражённого от ЗЛС, в зоне экрана при наличии остаточной сферической aberrации. Вертикальной чертой обозначен диаметр входного отверстия в экране.

метр пучка, освещающий образец ЗЛС по уровню $1/e^2$ — около 10 мм, расходимость лазерного излучения $\varphi = 10^{-3}$ рад, число Френеля, соответствующее данным параметрам при $\lambda = 0,53$ мкм равно 0,24, что практически определяет дальнюю зону. При отражении излучения от ЗЛС эквивалентный диаметр пучка, как было показано ранее, составляет 1,5 мм. Расстояние от ЗЛС до экрана — 4,64 м. Число, соответствующее этому расстоянию $F \approx 0,9$, что достаточно для определения зоны при практических измерениях.

На рис. 5 изображено относительное распределение излучения, отражённого от ЗЛС, в зоне расположения экрана с отверстием диаметром 2 мм, установленного перед фотоприёмным устройством. Кривая является расчётной. Практически при измерениях распределение в области экрана представляет собой яркое пятно при наличии менее яркого постаментов. Кривая, в целом, хорошо отражает вид реального распределения. Диаметр отверстия в 2 мм выбран с целью оптимального перехвата основной доли излучения в области приёма.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭПР ЗЛС

Измерения ЭПР ЗЛС проводились с использованием, как было указано выше, эталонной сферы подходящего радиуса кривизны. ЭПР ЗЛС рассчитывалось по следующей формуле:

$$\sigma_\lambda = E_i/E_e \sigma_{\lambda e}, \quad (9)$$

где $\sigma_{\lambda e}$ — величина ЭПР эталонной сферы (меры ЭПР) на длине волны λ , E_i , E_e — регистрируемые потоки отражённого излучения от измеряемого и эталонного образца соответственно. Величины потоков получали путём усреднения потоков, прошедших через диафрагму $\varnothing 2$ мм в экране перед фотоприёмником (см. рис. 4 и 5).

Таблица 2. Показатели точности измерений ЭПР оптических отражающих элементов поверхности σ

Диапазон измерений ЭПР ЛСЭ, м ²	Показатель точности (при $p = 0,95$) $\pm\delta$, м ²	Показатель повторяемости s_p , м ²	Предел повторяемости r , м ²	Показатель воспроизводимости s_R , м ²	Предел воспроизводимости R , м ²
От 0 до 1	8	0,3	1	2,5	7

При разработке методики измерений ЭПР ЗЛС были определены показатели точности, которые в соответствии с данной методикой необходимы для обработки результатов. Из совокупности результатов измерений, выполненных по данной методике, приписываемые пределы основной относительной погрешности измерений ЭПР ЛСЭ не превышают $\pm 10\%$.

При соблюдении всех регламентированных условий и проведении измерений в точном соответствии с предложенной методикой значения точности: показатель точности, показатель повторяемости, предел повторяемости, показатель воспроизводимости, предел воспроизводимости (ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002) результатов измерений не превышают значений, приведённых в табл. 2.

Переходим к анализу результатов измерений.

На рис. 6 приведены графики изменения ЭПР от угла поворота ЗЛС относительно его оптической и геометрической оси при наличии ошибок изготовления. Кривая 1 представляет собой угловую характеристику идеального образца, она — почти прямая горизонтальная линия, параллельная оси абсцисс, т.е. значение ЭПР не зависит от угла поля зрения α . На кривых 2, 3, 4 появляется волнообразная составляющая, характеризующая наличие ошибок изготовления, в частности, местных ошибок. Амплитуды волн невелики, $\Delta\sigma$ не превосходит $0,1$ м². На рис. 7 приведены кривые, рассчитанные по формуле (8). Кривая 1 — расчётная кривая, полученная при от-

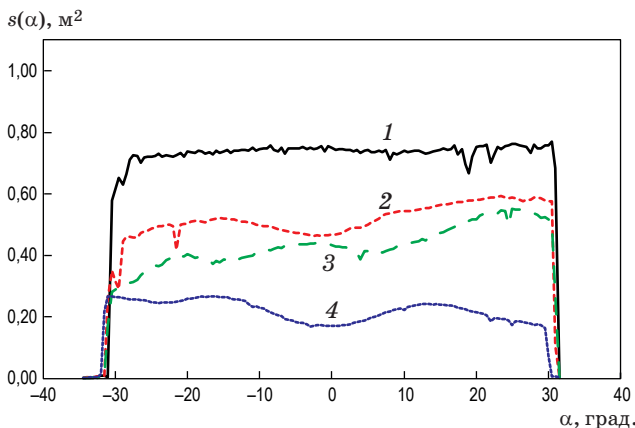


Рис. 6. Влияние качества поверхности на диаграмму ЭПР отражённого излучения: 1 — при отсутствии ошибок изготовления, 2–4 — ЭПР при наличии зональных ошибок изготовления поверхности ЗЛС.

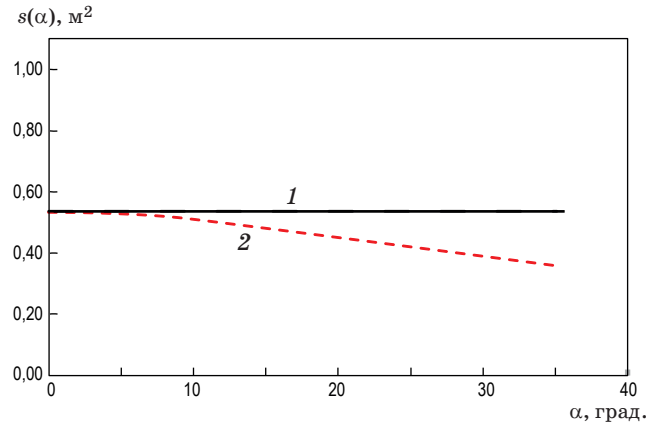


Рис. 7. Результаты расчёта ЭПР ЗЛС: при отсутствии фазовой неоднородности (кривая 1) и при наличии фазовой неоднородности величиной $\lambda/2$ ($0,22 \times 10^{-3}$ мм) — кривая 2.

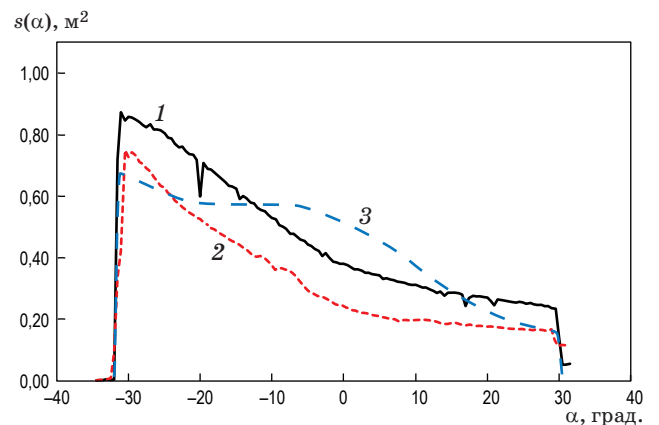


Рис. 8. Зависимость ЭПР от угла падения лазерного излучения α на ЗЛС. Кривые 1 и 2 — экспериментальные кривые, 3 — расчёт по формулам работы [6].

сутствии ошибок изготовления. Она представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс. Кривая 2 — расчётная кривая при наличии ошибки изготовления, соответствующей общей ошибке $\Delta\sigma \approx 0,1$. Как видим, фазовые искажения отраженного от задней поверхности ЗЛС излучения с величиной $\lambda/2$ приводят к изменению ЭПР не более $0,1$ м².

Графики на рис. 8 демонстрируют сложный характер измеренных кривых зависимости ЭПР от угла поворота ЗЛС относительно его оси. Характерный наклон кривой говорит о наличии значи-

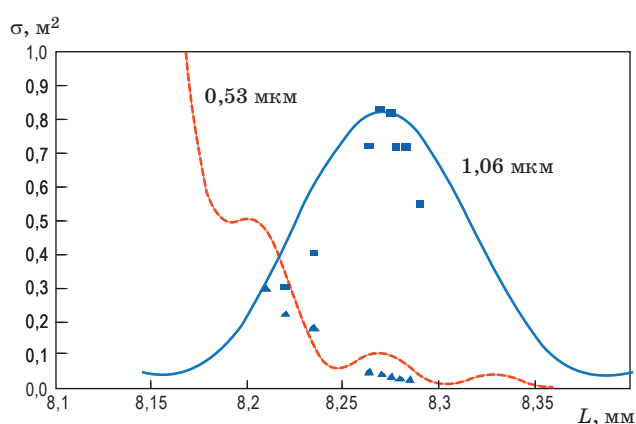


Рис. 9. Зависимость ЭПР от длины по оси ЗЛС. Линии — расчётные зависимости для двух длин волн, символами обозначены измеренные данные ЭПР ЗЛС (треугольники для длины волны 0,53 мкм, квадраты — для $\lambda = 1,06$ мкм).

тельной децентрировки поверхностей. Кривые 1 и 2 отличаются величиной децентрировки поверхностей. Кривая 3 — расчётная кривая, полученная по формулам работы [6]. В целом, расчётная кривая передаёт общий характер измеренной характеристики, но точность её невелика.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Краснящих А.В.* Разработка и исследование оптико-электронной системы измерения деформации крупногабаритных инженерных сооружений // Автореферат канд. дис. тех. наук. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2004. 181 с.
2. *Садовников М.А.* Точность определения поправки приведения измерений к центру масс цели в высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 8. С. 63–66.
3. *Садовников М.А., Соколов А.Л., Шаргородский В.Д.* Анализ эквивалентной поверхности рассеяния уголкового отражателя с различным покрытием граней // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 8. С. 55–62.
4. *Медведков И.А., Потапова Н.И., Цветков А.Д., Шкатов О.Ю.* Световозвращающий элемент для моделирования отражательных характеристик светового, в том числе лазерного излучения // Патент РФ. № 2349940. 2009.
5. *Цветков А.Д.* Катадиоптрический световозвращатель // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 3. С. 21–25.
6. *Цветков А.Д.* Влияние параметров катадиоптрического световозвращателя на характеристики его углового поля // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 5. С. 13–17.
7. *Климков Ю.М.* Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. М.: Советское радио, 1978, 264 с.
8. *Барышников Н.В., Степанов Р.О.* Разработка метода и аппаратуры измерений световозвращательных характеристик оптико-электронных систем инфракрасного диапазона // Измерительная техника. 2007. № 9. С. 24–28.
9. *Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. М.: Советское радио, 1975. 348 с.

На рис. 9 приведены данные расчёта (сплошные линии) и измерений (символы) величины ЭПР ЗЛС в зависимости от длины по оси ЗЛС для двух длин волн. Символами обозначены измеренные данные ЭПР образцов (треугольники — для длины волны 0,53 мкм, квадраты — для $\lambda = 1,06$ мкм). Как видим на графиках, измеренные данные ЭПР вполне удовлетворительно совпадают с расчётными значениями. Это подтверждает правильность расчётной модели.

ВЫВОДЫ

Представленная работа является обоснованием метода измерения ЭПР зеркально-линзовых световозвращающих элементов.

В основе работы лежит расчётно-теоретическое исследование и практические измерения ЭПР ЗЛС элементов, сопоставление результатов исследований и выводы об адекватности расчётной модели практическим измерениям.

Как показали исследования, расчётная модель в ряде случаев адекватно описывает эксперимент, в некоторых случаях модель имеет значительные отступления при одновременном совпадении тенденции хода кривых.