

УДК:

Моделирование погрешностей измерений диаметра широкоапертурного лазерного пучка с плоским профилем

И. С. Мацак^{1,2,a}, Е. М. Кудрявцев¹, В. Ю. Тугаенко²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет,
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31

² ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева,
Россия, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, д. 4а

E-mail: ^aISMatsak@mephi.ru

Получено 31 октября 2014 г.,
после доработки 12 января 2015 г.

Работа посвящена моделированию инструментальных погрешностей измерения диаметра лазерного пучка при использовании метода на основе ламбертовски рассеивающего на просвет экрана. В качестве модели пучка использовалось суперлоренцево распределение. Для определения влияния на погрешность измерения каждого из параметров проводились вычислительные эксперименты, результаты которых аппроксимировались аналитическими функциями. Были получены зависимости погрешностей от относительного размера пучка, пространственной неравномерности пропускания экрана, дисторсии объектива, физического виньетирования, наклона пучка, пространственного разрешения матрицы, разрядности АЦП-камеры. Показано, что погрешность может быть менее 1 %.

Ключевые слова: лазерный пучок, диаметр лазерного пучка, моделирование погрешностей, суперлоренцево распределение

Modelling diameter measurement errors of a wide-aperture laser beam with flat profile

I. S. Matsak^{1,2}, E. M. Kudryavtsev¹, V. Yu. Tugaenko²

¹ National Research Nuclear University "MEPhI", 31 Kashirskoye shosse, Moscow, 115409, Russia

² S. P. Korolev Rocket and Space Corporation "Energia", 4A Lenin st., Korolev, Moscow area, 141070, Russia

Abstract. — Work is devoted to modeling instrumental errors of a laser beam diameter measurement using a method based on a lambertian transmissive screen. Super-Lorenz distribution was used as a model of the beam. To determine the effect of each parameter on the measurement error were performed computational experiments, results of which were approximated by analytic functions. There were obtained the errors depending on relative beam size, spatial non-uniformity of the transmission screen, lens distortion, physical vignetting, beam tilt, CCD spatial resolution, ADC resolution of a camera. There was shown that the error can be less than 1 %.

Keywords: laser beam, laser beam diameter, error modeling, super-Lorentzian distribution

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 113–124 (Russian).

Введение

Разрабатываемая технология беспроводной передачи энергии (БПЭ) между космическими аппаратами [Remote Electric Power..., 2011] предполагает разработку оптических систем для создания широкоапертурных лазерных пучков с равномерным профилем. Для испытаний экспериментального образца оптической системы были предложены методы и средства измерений характеристик лазерного пучка [Мацак, Тугаенко, Сергеев, 2014]. Схема разработанной измерительной системы приведена на рисунке 1. Лазерный пучок (1) попадает на ламбертовски рассеивающий на просвет экран (2). С помощью объектива (3) изображение лазерного пучка проецируется на CCD-матрицу (4), сигнал считывается и формируется в файл электроникой камеры (5). Файл обрабатывается программным обеспечением (7) компьютера (6).

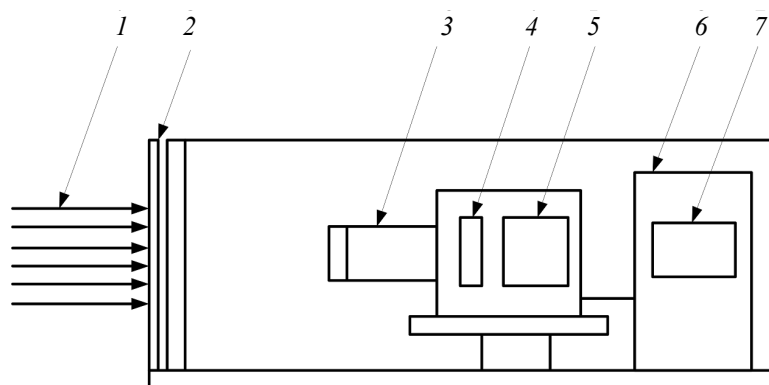


Рис. 1. Схема измерений широкоапертурных пучков. 1 — лазерный пучок, 2 — рассеивающий экран, 3 — объектив, 4 — CCD матрица, 5 — электроника камеры, 6 — компьютер, 7 — программное обеспечение

Аналогичные схемы измерений используются в экспериментальных работах, например [Кострюков, 2009], но проблема обеспечения точности измерений, определяемой рядом факторов, не исследована полностью. В работе [Мацак, Тугаенко, Сергеев, 2014] была выполнена оценка погрешностей измерения по стандартной методике. В данной работе рассматривается более точное исследование с применением моделирования, так как оптимизация системы может быть проведена только при наличии модели влияния всех факторов на погрешность измерений. Моделирование погрешностей является стандартной практикой при разработке методов и средств измерений параметров лазерных пучков, основанных на матричном методе, и использовалось в работах [Roundy, 1998; Шелдакова, 2007; Абдрахманов, 2013], где рассматривались погрешности определения диаметра лазерного пучка с гауссовым профилем через вторые моменты распределения плотности мощности (энергии). Результаты экспериментальных оценок по стандарту [EMVA Standard 1288, 2010] представлены в работе [Конник, Манькин, Стариков, 2010]. В настоящей работе представлены данные, позволяющие расширить и обобщить результаты, полученные вышеприведенными авторами, на случаи:

- использования критерия 90 % мощности для измерения диаметра пучка согласно [ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008, 2010];
- негауссового пучка;
- наличия в схеме измерения экрана и объектива.

Модели и методы

Модель пучка

В качестве модели пучка с плоским профилем в работах [Li, 2002; Shealy, Hoffnagle, 2006] рассматриваются суперлоренцево распределение (1), распределение Ферми–Дирака (2), супер-

гауссово распределение (3) или сглаженное распределение Гаусса (4):

$$w(r) = \alpha \left[1 + (\chi_{0.9} \cdot r/R)^M \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$w(r) = \alpha \left\{ 1 + \exp \left[\beta \cdot (\chi_{0.9} \cdot r/R - 1) \right] \right\}^{-1}, \quad (2)$$

$$w(r) = \alpha \cdot \exp \left[-2 \cdot (\chi_{0.9} \cdot r/R)^p \right], \quad (3)$$

$$w(r) = \alpha \cdot \exp \left[-2(N+1)(\chi_{0.9} \cdot r/R)^2 \right] \cdot \sum_{n,m}^N \frac{\left[(N+1)(\chi_{0.9} \cdot r/R)^2 \right]^{n+m}}{n!m!}, \quad (4)$$

где α — нормирующий коэффициент, r — радиальное смещение, R — номинальный радиус по критерию 90 % мощности, $\chi_{0.9}$ — коэффициент приведения к критерию 90 % мощности, M , β , p и N — порядки распределений.

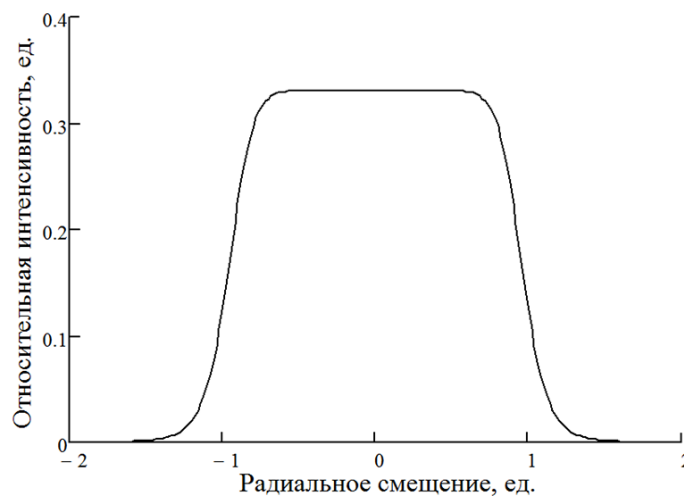


Рис. 2. Нормированное суперлоренцево распределение ($M = 12$)

При специальном подборе коэффициентов M , β , p и N распределения становятся близки по форме. В частности, нормированные суперлоренцево распределение при $M = 12$ (рис. 2), распределение Ферми–Дирака при $\beta = 12$, супергауссово распределение при $p = 8$ и сглаженное распределение Гаусса при $N = 8$ отличаются незначительно, поэтому любая из функций может быть использована для моделирования погрешностей измерения. При тестировании в среде MathCAD минимальное время для стандартных вычислений потребовалось для суперлоренцево распределения, которое было выбрано в качестве модели пучка. Для суперлоренцево распределения 12-го порядка коэффициент приведения к критерию определения диаметра по уровню 90 % мощности, заключенного в пределах круга радиусом R , составил $\chi_{0.9} = 1.014$.

Структура погрешностей

В качестве основных факторов, определяющих результирующую погрешность и подлежащих моделированию, выделены следующие:

- относительный размер пучка;
- параметры CCD-камеры (разрешение, разрядность АЦП);
- виньетирование;
- дисторсия объектива;

- отклонение оси пучка от нормали экрана;
- пространственная неравномерность пропускания экрана.

Методика определения диаметра

Поперечная протяженность круглого пучка может быть охарактеризована диаметром или шириной. Для измерения диаметра пучка используются методы, отличающиеся способами получения данных и применяемыми критериями. В данной работе рассматривается метод, основанный на использовании камеры для получения относительного распределения плотности мощности в пучке $I(i, j)$, где i, j — номера строки и столбца пиксела фоточувствительной матрицы камеры. Диаметр пучка считается диаметр d окружности, внутри которой заключено 90 % мощности. Критерий 90 % мощности в декартовых координатах [Мацак, Тугаенко, Сергеев, 2014]:

$$p(d) = \frac{\sum_i \sum_j \left[I_{i,j} \cdot \theta \left[d^2 - 4 \left\{ (j - X_c)^2 + (i - Y_c)^2 \right\} \right] \right]}{\sum_i \sum_j I_{i,j}} - 0.9, \quad (5)$$

где $\theta(x)$ — функция Хевисайда, $X_c = \sum_i \sum_j j \cdot I_{i,j}$ и $Y_c = \sum_i \sum_j i \cdot I_{i,j}$ — координаты энергетического центра пучка.

Диаметр d находят путем численного определения нуля интерполяции функции (5):

$$f_{\text{int}}(p(d)) = 0. \quad (6)$$

Методика моделирования

Моделирование проводилось в среде MathCAD 15. Для определения погрешностей модель пучка помещалась в центр плоскости с пространственным разрешением $m \times m$. Для определения каждой из компонент погрешности проводилось по 11 экспериментов при случайных смещениях центра с координатами (X_c, Y_c) на величины $(\Delta X_c, \Delta Y_c)$, равномерно распределенные на интервалах $X_c \pm 10\%$ и $Y_c \pm 10\%$ соответственно. Для определения доверительного интервала случайных погрешностей использовался коэффициент Стьюдента для $t_{\alpha=0,5; n=11} = 2.2$. Моделируемые параметры изменялись в пределах, которые обычно встречаются для данного типа компонентов. Немоделируемые параметры принимались константами, вносящими погрешность на уровне 10^{-4} . Полученные при моделировании данные аппроксимировались аналитическими функциями, вид которых подбирался экспериментально. Параметры функций определялись методом наименьших квадратов с помощью встроенной функции genfit или экспериментально при грубых ошибках, выдаваемых функцией. При обнаружении влияния немоделируемого параметра на погрешность учитывалась степень влияния и на графиках отображались дополнительные зависимости.

Результаты моделирования

Относительный размер пучка

Для обеспечения точности измерения параметров пучка необходимо, чтобы значительная доля мощности пучка попадала на площадь интегрирования. Согласно рекомендациям [ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008, 2010] линейный размер площади интегрирования должен превышать диа-

метр пучка в 3–5 раз, что для размеров пучка до нескольких сантиметров является приемлемым. При размерах пучка более 10 см это требование приводит к значительному увеличению габаритов измерительной установки. Для оптимизации этого параметра проводилось моделирование зависимости погрешности измерения от относительного диаметра пучка. Относительный диаметр изменялся в пределах (0.1;0.8) при разрешении матрицы $m \times m = 512 \times 512$. На рисунке 3 представлены результаты моделирования, аппроксимированные кривой зависимости погрешности определения диаметра от значения относительного диаметра:

$$\varepsilon_{\text{отн}}(q) \approx -7.6 \cdot 10^{-2} \cdot q^{9.4}, \quad (7)$$

где $q = d/L_{\text{э}}$ — относительный диаметр, $L_{\text{э}}$ — поперечный размер квадратного экрана, d — диаметр пучка.

Согласно (7) при измерении широкоапертурных пучков с плоским профилем достаточно, чтобы экран был в два раза больше пучка ($q = 0.5$). При этом вклад этого фактора в результирующую погрешность не превысит 0.1 %. Отклонение центра пучка от центра экрана аналогично уменьшению размеров экрана, так как влияние оказывает ближайший к центру пучка край площади интегрирования. Поэтому точность позиционирования стоит учитывать путем умножения аргумента функции (7) на коэффициент $\gamma = 1 \pm \Delta c / \sqrt{2}$, где Δc — ожидаемая точность позиционирования.

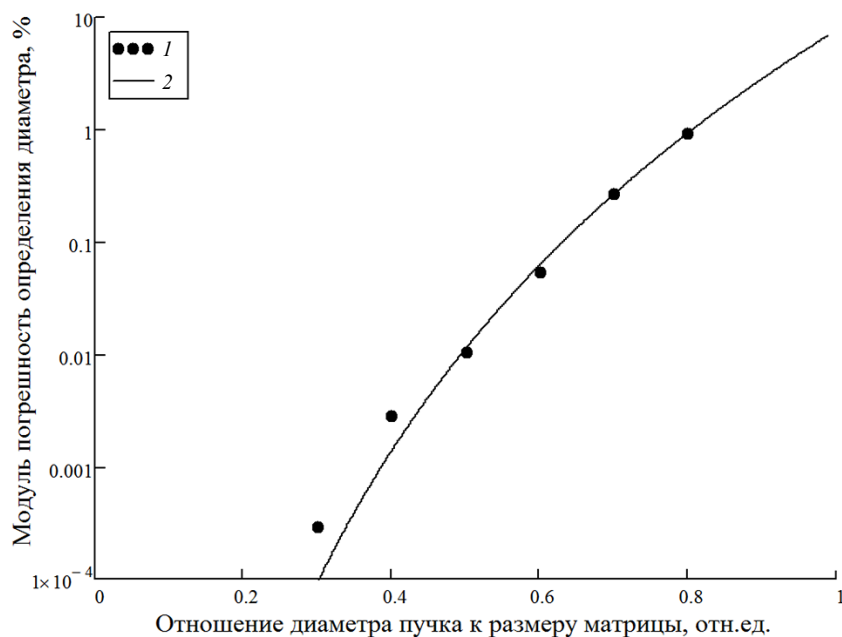


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения диаметра от относительного размера пучка. 1 — результат моделирования погрешности (модуль), 2 — модуль аппроксимации (7)

Параметры камеры

Использование цифровых камер на основе CCD или CMOS-матриц является наиболее предпочтительным способом получения данных о характеристиках лазерных пучков, что отражено в российских и зарубежных стандартах и научных публикациях [ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008; Roundy, 1998]. Детальное рассмотрение шумов и характеристик матрицы представлено в работе [Конник, Манькин, Стариков, 2010]. Ниже рассмотрены влияние разрешения матрицы и разрядности АЦП, а также учет влияния шума на эффективную разрядность АЦП через соотношение «сигнал–шум + дисторсия».

а. Разрешение матрицы

Была промоделирована погрешность измерения диаметра в зависимости от разрешения матрицы для пучка с относительным диаметром $q = 0.5 \pm 10\%$ при его отклонении от центрального положения в пределах $\pm 10\%$. Моделирование проводилось для размеров матриц $m \times m$ от 64×64 до 1024×1024 с шагом кратным 2. На рисунке 4 представлены результаты моделирования и аппроксимирующая зависимость погрешности от размера диаметра в пикселях:

$$\varepsilon_p(r) \approx \pm 0.8 \cdot (r \cdot q)^{-1.5}, \quad (8)$$

где r — разрешение матрицы, $q = 0.5$ — относительный диаметр.

В рекомендациях [ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008, 2010] шаг матричного преобразователя должен составлять не менее $1/20$ ширины пучка, что согласно соотношению (8) составит $\varepsilon_p(20) \approx 0.3\%$. Согласно соотношению (8) при относительном диаметре $q = 0.1 - 0.6$ оптимальным является разрешение матрицы 512×512 . При этом вклад погрешности, обусловленной разрешением матрицы, не превысит 0.1% .

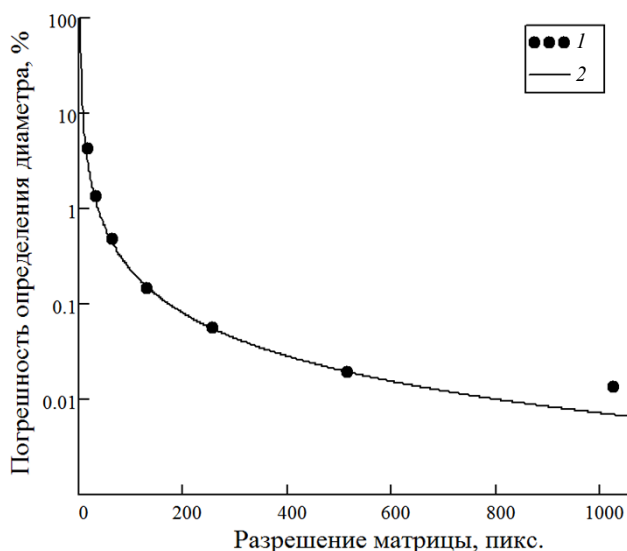


Рис. 4. Зависимость погрешности измерения диаметра от разрешения матрицы. 1 — результат моделирования погрешности, 2 — аппроксимация (8)

б. Разрядность АЦП

Моделирование было проведено на матрице размером 512×512 при относительном размере пучка $d/L_0 = 0.5$ в диапазоне разрядностей от 2 до 16 бит. Полученные результаты (рис. 5) были аппроксимированы функцией

$$\varepsilon_{\text{АЦП}}(n) \approx \pm 0.12 \cdot 1.7^{-n}, \quad (9)$$

где n — разрядность АЦП-камеры.

Результаты моделирования показали, что уровень погрешности 0.1% , обусловленной разрядностью АЦП, может быть обеспечен при разрядности более 8 бит. Учитывая, что эффективная разрядность АЦП, определяемая по формуле (10) [Kester, 2004], всегда ниже номинальной [Baker, 2008; Шефер, 2011], то разрядность АЦП должна составлять не менее 10 бит.

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.7}{6.02}, \quad (10)$$

где $ENOB$ — эффективное число бит, $SINAD$ — соотношение «сигнал-шум + дисторсия».

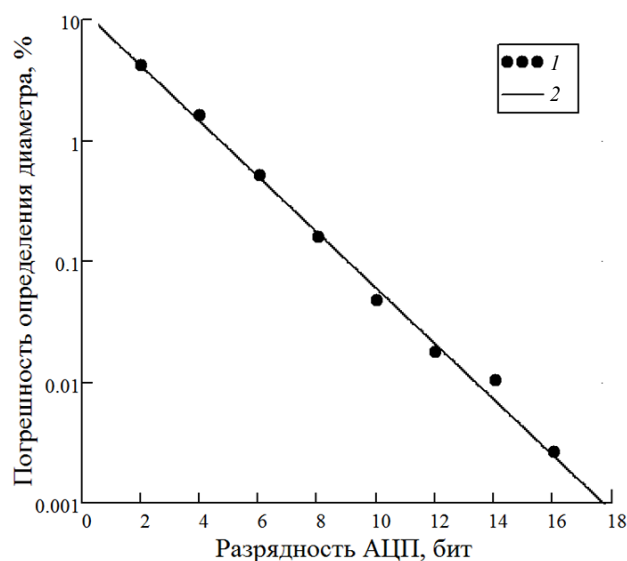


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения диаметра от разрядности АЦП. 1 — результат моделирования погрешности, 2 — аппроксимация результатов моделирования (9)

Виньетирование

При фотографировании объекта с равномерным распределением яркости по его площади освещенность в плоскости изображения будет падать от центра к краям, что вызвано различными видами виньетирования — механическим, физическим, оптическим и пиксельным. При этом суммарное виньетирование работы измерительной установки может быть установлено экспериментально. Механическое виньетирование в согласованных системах обычно отсутствует, оптическое виньетирование может быть значительно снижено путем увеличения диафрагменного числа до значений 5.6–11 [Asada, Amano, Baba, 1996]. Вклад пиксельного виньетирования зависит от геометрических параметров ячейки CMOS (CCD) сенсора и зачастую уже устранено производителем [Catrysse, Liu, El Gamal, 2000]. Физическое виньетирование является неустранимым фактором и определяется четвертой степенью косинуса угла, под которым видна часть плоскости экрана:

$$E_{\theta}/E_0 = \cos^4 \theta, \quad (11)$$

где E_{θ} — освещенность в плоскости изображения, полученная от точки в плоскости предметов, расположенной под углом θ к оптической оси. E_0 — освещенность в плоскости изображения, полученная от центральной точки в плоскости предметов.

Для определения погрешности диаметра в результате физического виньетирования было проведено моделирование в пределах углов от 5 до 45 градусов при относительном диаметре пятна $q = 0.5$. Результаты представлены на рисунке 6 и аппроксимированы функцией

$$\varepsilon_{\cos\theta}(\theta) = -0.06 \cdot (\theta \cdot q)^{2.2}, \quad (12)$$

где θ — угол поля зрения камеры, $q = 0.5$ — относительный диаметр.

Дисторсия объектива

Дисторсия объектива присутствует практически во всех объективах. Ее значение приводится в паспорте изделия или может быть оценено путем фотографирования тест-объекта с последующей обработкой изображения. Искажение поля, в простейшем случае заключающееся

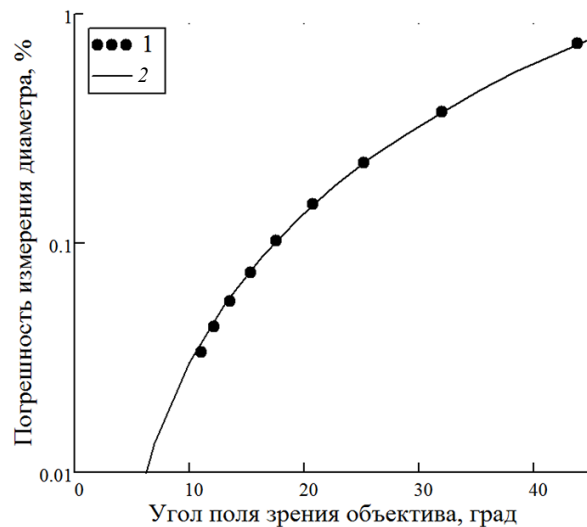


Рис. 6. Зависимость погрешности измерения диаметра в результате физического виньетирования от поля зрения объектива. 1 — результат моделирования, 2 — аппроксимация (12)

в плавном изменении коэффициента увеличения от центра к краю изображения, может вносить существенные погрешности в определении характеристик пучков. В качестве модели радиальной дисторсии было использовано преобразование координат, рассмотренное в работе [Weng, Cohen, Herniou, 1992]. Коэффициент дисторсии задавался в процентах как ТВ-дисторсия в пределах от -10% до 10% . Для моделирования был использован ряд значений дисторсии $\pm(0.03; 0.05; 0.1; 0.5; 1; 5; 10)$.

Полученные значения (рис. 7) были аппроксимированы кусочной функцией

$$\varepsilon_{\text{дис}}(s) = \begin{cases} \left(-s^{\frac{5}{6}} + 0.06 \right) \cdot 10^{-2}, & \text{если } s > 0, \\ \left(-1.3 \cdot s + 0.02 \right) \cdot 10^{-2}, & \text{если } s < 0, \end{cases} \quad (13)$$

где значение s — значение ТВ-дисторсии.

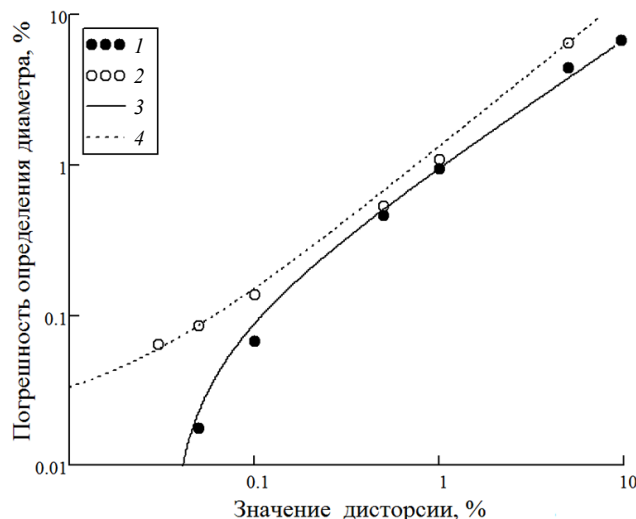


Рис. 7. Зависимость модуля погрешности измерения диаметра от значения дисторсии объектива. 1 и 3 — результат моделирования положительной дисторсии и аппроксимация (13). 2 и 4 — результат моделирования отрицательной дисторсии и аппроксимация (13)

Наклон пучка

Влияние наклона появляется ввиду деформации изображения пучка в направлении наклона. Расчет влияния наклона пучка важен для определения требований к точности угловой ориентации осей измерительной системы и пучка. Моделирование проводилось для ряда значений (0.5;1;2;4;6;8;10;15) градусов. Данные, полученные в результате моделирования, представлены на рисунке 8 и аппроксимированы кривой

$$\varepsilon_{\text{накл}}(\alpha) = 1 - \sqrt{\cos(\alpha)}, \quad (14)$$

где α — угол наклона пучка.

Помимо точности позиционирования системы относительно пучка значение угла α может включать в себя и точность определения оси системы. Погрешность является односторонней и всегда приводит только к увеличению измеренного значения.

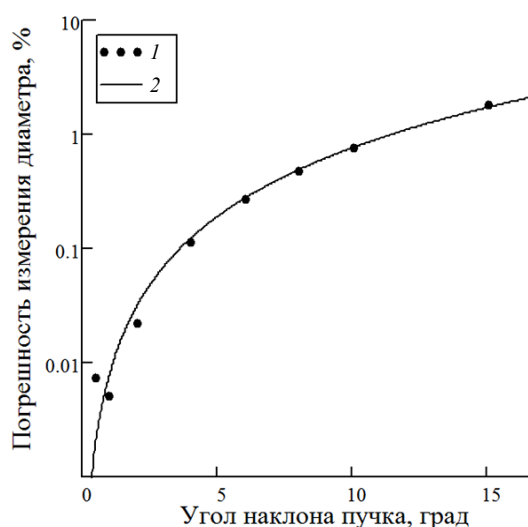


Рис. 8. Зависимость погрешности измерения диаметра от угла наклона пучка относительно экрана. 1 — результат моделирования, 2 — аппроксимация (14)

Неравномерность пропускания экрана

В качестве материала, ламбертовски рассеивающего на просвет экрана могут использоваться матовое стекло, полимерные диффузные рассеиватели, бумага, прозрачные материалы с флюоресцентными покрытиями. Неоднородность структуры материала приводит к неравномерности коэффициента пропускания (преобразования). На погрешность влияет как значение отклонения, так и его пространственное распределение.

а. Размер неоднородностей

Для моделирования зависимости погрешности измерения от размера неоднородностей площадь интегрирования разбивалась на квадратные ячейки с размером относительно пучка в диапазоне (0.02;1.3). Каждой ячейке присваивался коэффициент, распределенный по закону Гаусса со средним $\mu = 1$ и стандартным отклонением $\sigma = 0.1$. Данные могут быть использованы для оценки вклада погрешности, вызванной пространственной неравномерностью чувствительности матрицы, если значение $\sigma/\mu \leq 0.1$. Результаты моделирования представлены на рисунке 9 и аппроксимированы кривой

$$\varepsilon_{\text{орн}}(\eta) = \pm 1.4 \cdot 10^{-2} \cdot \eta^{0.8}, \quad (15)$$

где η — относительный размер неоднородностей.

в. Значение неравномерности коэффициента пропускания

Для моделирования зависимости погрешности от неравномерности коэффициента пропускания, заданного как стандартное отклонение, использована площадка с относительными размерами $\eta = 0.1$, что соответствует погрешности $\varepsilon_{\text{орн}} \approx 0.2\%$. Отклонение задавалось в диапазоне (0.01; 0.3). Данные, полученные в результате моделирования, представлены на рисунке 9 и аппроксимированы кривой:

$$\varepsilon_{\text{озн}}(\sigma) = \pm 1.3 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma^{0.73}, \quad (16)$$

где σ — неравномерность коэффициента пропускания.

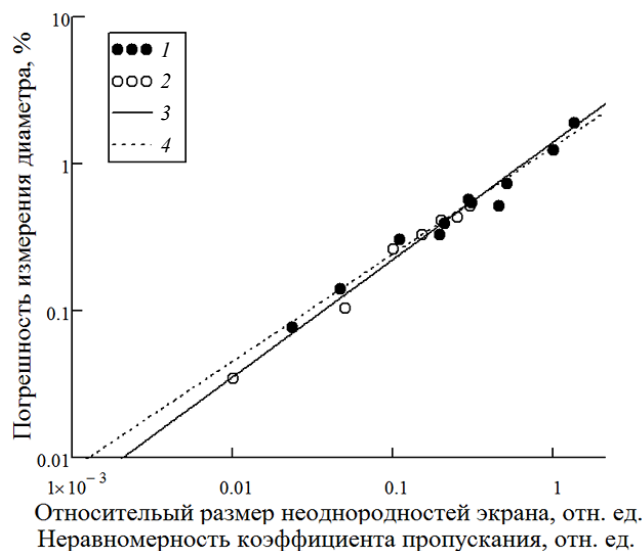


Рис. 9. Зависимость погрешности измерения диаметра от неравномерности коэффициента пропускания и относительного размера неоднородностей. 1 — результат моделирования по размеру неоднородностей, 3 — аппроксимация (15), 2 — результат моделирования по неравномерности пропускания, 4 — аппроксимация (16)

Заключение

Полученные в результате моделирования аналитические зависимости могут быть использованы для расчета погрешностей определения диаметра широкоапертурного пучка с плоским профилем при использовании метода измерения на основе рассеивающего на просвет экрана, объектива и камеры, как это представлено на рисунке 1. Измерительная схема является масштабируемой, поэтому пригодна для измерения диаметра лазерных пучков с плоским профилем размеров от 1 см до нескольких метров.

В частности, для достижения целевого показателя уровня погрешностей менее 1% могут быть использованы параметры измерительной схемы, приведенные в таблице 1. Частные погрешности были рассчитаны по формулам (7)–(9) и (12)–(16).

Погрешности 1, 3 и 4 являются односторонними систематическими и могут до некоторой степени взаимно компенсироваться. Погрешности 2а, 2б, 6а и 6б являются случайными. Погрешность 5 определяется точностью установки экрана относительно пучка и будет изменяться от измерения к измерению.

Суммарная погрешность может быть определена как сумма односторонней и двусторонней погрешностей согласно следующим соотношениям:

$$\delta_{\pm} = \pm \sqrt{\varepsilon_p^2 + \varepsilon_{\text{АЦП}}^2 + \varepsilon_{\text{орн}}^2 + \varepsilon_{\text{озн}}^2} = \pm 2.0 \cdot 10^{-3}, \quad (17)$$

$$\delta_+ = \varepsilon_{\text{отн}} + \varepsilon_{\cos\theta} + \varepsilon_{\text{дис}} + \varepsilon_{\text{накл}} = -3.6 \cdot 10^{-3}, \tag{18}$$

$$\delta_{\Sigma} = \delta_+ + \delta_{\pm} = (-3.6 \pm 2.0) \cdot 10^{-3}. \tag{19}$$

Из соотношения (19) видно, что при выбранных параметрах инструментальная погрешность измерения диаметра не превысит 1 %. ($|\delta_{\Sigma}| < 1\%$). Для этого требуется использовать промышленную камеру с высокой разрядностью АЦП, объектив с низкой дисторсией и малым углом зрения и экран с малым размером неоднородностей и характеризующей их неравномерностью коэффициента пропускания.

Таблица 1. Вклад различных факторов в погрешность измерения диаметра лазерного пучка с плоским профилем

№	Фактор	Рекомендованное значение параметра	Погрешность
1	Относительный размер пучка	$q = 0.5$	$\varepsilon_{\text{отн}} = -1.13 \cdot 10^{-4}$
2a	Разрешение матрицы	$r = 512$	$\varepsilon_p = \pm 2.0 \cdot 10^{-4}$
2b	Разрядность АЦП	$n = 10$	$\varepsilon_{\text{АЦП}} = \pm 6.0 \cdot 10^{-4}$
3	Виньетирование	$\theta = 12^\circ$	$\varepsilon_{\cos\theta} = -4.2 \cdot 10^{-4}$
4	Дисторсия объектива	$s = 0.5\%$	$\varepsilon_{\text{дис}} = -5.0 \cdot 10^{-3}$
5	Наклон пучка	$\alpha = 5^\circ$	$\varepsilon_{\text{накл}} = 1.9 \cdot 10^{-3}$
6a	Относительный размер неоднородностей экрана	$\eta = 0.05$	$\varepsilon_{\text{орн}} = \pm 1.3 \cdot 10^{-3}$
6b	Относительное значение неравномерности пропускания экрана	$\sigma = 0.05$	$\varepsilon_{\text{озн}} = \pm 1.5 \cdot 10^{-3}$

Список литературы

- Абдрахманов К. Ш.* Методы и средства измерений пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 [место защиты: Всерос. науч.-исслед. ин-т оптико-физ. измерений]. — М., 2013. — 140 с.
- ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008. Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 1. Стигматические (гомоцентрические) и слабо-астигматические пучки. — М.: Стандартинформ, 2010. — 20 с. (Лазеры и лазерные установки (системы).)
- Конник М. В., Манькин Э. А., Стариков С. Н.* Расширение возможностей коммерческой цифровой фотокамеры для регистрации пространственных распределений интенсивности лазерного излучения // Квантовая электроника. — 2010. — Т. 40, № 4. — С. 314–320.
- Кострюков П. В.* Пространственная структура излучения при синхронизации поперечных мод в лазерах с продольной накачкой: автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.2 [место защиты: Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова]. — М., 2009. — 20 с.
- Мацак И. С., Тугаенко В. Ю., Сергеев Е. С.* Метод измерения диаметра широкоапертурного пучка лазерного излучения // Метрология. 2014. — № 4. — С. 13–24.
- Шелдакова Ю. В.* Диагностика лазерных пучков и управление их пространственными характеристиками методами адаптивной оптики: диссертация ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.21 [место защиты: Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова]. — М., 2007. — 149 с.
- Шефер Э.* Эффективное число битов (ENOB) цифрового осциллографа R&S // Контрольно-измерительные приборы и системы. — 2011. — № 3. — С. 27–32.
- Asada N., Amano A., Baba M.* Photometric calibration of zoom lens systems // Pattern Recognition. — 1996. — Proceedings of the 13th International Conference on. — Vol. 1. — P. 186, 190.

- Baker B.* A Glossary of Analog-to-Digital Specifications and Performance Characteristics. Technical Report SBAA147A, Texas Instruments, 2008.
- Bhasker E., Juang R., Majumder A.* Registration Techniques for Using Imperfect and Partially Calibrated Devices in Planar Multi-Projector Displays // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. — 2007. — Vol. 13, No. 6. — P. 1368–1375.
- Catrysse P. B., Liu X., El Gamal A.* QE reduction due to pixel vignetting in CMOS image sensors // Proc. SPIE 3965, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications. — May 15, 2000. — Vol. 420.
- EMVA Standard 1288. Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras // European Machine Vision Association. — 2010. — Release 3.0 — 36 p. URL: http://www.emva.org/cms/upload/Standards/Standard_1288/EMVA1288-3.0.pdf (дата обращения 26.05.2014).
- Kester W.* Analog-Digital Conversion, Analog Devices, Chapter 6. — 2004.
- Li Y.* Light beams with flat-topped profiles // Opt. Lett. — 2002. — Vol. 27. — P. 1007–1009.
- Remote Electric Power Transfer Between Spacecrafts by Infrared Beamed Energy / Chertok B. E. et al. // AIP Conference Proceedings. — 2011. — Vol. 1402. — P. 489–496.
- Roundy C. B.* CCD camera baseline calibration and its effects on imaging processing and laser beam analysis // Proc. SPIE 3110, 10th Meeting on Optical Engineering in Israel. — 1997. — Vol. 860. — P. 860–879.
- Roundy C. B.* Techniques for accurately measuring laser beam width with commercial CCD cameras // Proc. SPIE 3405, ROMOPTO '97: Fifth Conference on Optics. — 1998. — Vol. 1045. — P. 1045–1055.
- Shealy D. L., Hoffnagle J. A.* Laser beam shaping profiles and propagation // Appl. Opt. — 2006. — Vol. 45. — P. 5118–5131.
- Weng J., Cohen P., Herniou M.* Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. — 1992. — Vol. 14, No. 10. — P. 965, 980.