

Определение положения центра лазерного пучка при превышении динамического диапазона матричного приемника

Д. А. ОРЛОВ, Е. А. НЕВЕРОВА

Московский энергетический институт (технический университет), Москва, Россия,
e-mail: elneverova@yandex.ru

Рассмотрено влияние насыщения матричного приемника при определении координат центра лазерного пучка методом взвешивания. Исследована зависимость точности измерений от размера пучка и числа насыщенных пикселей на фотоприемной матрице. Проведено численное моделирование выходного сигнала. Модельные расчеты сопоставлены с результатами эксперимента.

Ключевые слова: лазерный гауссов пучок, матричный фотоприемник, метод взвешивания, центроидные алгоритмы.

The influence of focal plane array saturation at subpixel centroid estimation of near point laser target images have been investigated. The measurement results were compared with mathematical simulation. The influence of image size and number of saturated pixels on measurements precision was studied. The new algorithm has been optimized for improvement of the laser systems dynamic range.

Key words: Gaussian shape laser, saturated image, subpixel resolution, centroid algorithms.

В прикладных областях оптических измерений от точности измерения координат лазерного пучка во многом зависят параметры всей оптико-электронной системы. Особенно важно решение этой задачи для определения направления в активных системах ориентирования и оптической локации, в которых в качестве устройства захвата изображения применяются фотоприемные матрицы (ФПМ), а в качестве источников излучения — импульсные лазеры [1].

Для нахождения энергетического центра пучка широкое распространение получили центроидные алгоритмы, прежде всего, основанные на методе взвешивания [2—4], и корреляционные методы [5]. Метод фильтрации изображения с последующей обработкой можно выделить в отдельную группу [6]. Все эти методы позволяют оценить положение изображения источника с субпиксельной точностью [3, 6], однако для быстродействующих систем чаще всего применяются метод взвешивания и его модификации [4] благодаря низким требованиям к быстродействию вычислителя.

При оценке погрешности измерения и оптимизации процедур обработки сигнала важную роль играет математическое моделирование измерительной системы. Распределение интенсивности лазерного пучка при моделировании часто представляют гауссовой или прямоугольной формами [2, 3, 7, 8], которые точнее описывают распределение интенсивности в плоскости изображения объектива. Отображение пучка в линейном диапазоне чувствительности ФПМ при изменении внешних условий требует регулировки экспозиции, что обычно осуществляется изменением времени выдержки матрицы или механическим аттенуатором, установленным в оптическом тракте.

Воздействие внешних факторов, таких как изменение прозрачности оптического тракта или изменение дальности до объекта наблюдения, приводит к вариации плотности энергии в плоскости изображения в несколько раз [9], в результате чего сигнал может выходить за границу динами-

ческого диапазона приемника, а на изображении с ФПМ появляются насыщенные пиксели. При регистрации одиночных импульсов подстройка уровней сигнала практически невозможна. Ниже для расширения динамического диапазона измерительных систем (импульсных дальномеров и оптических локаторов [1]) предложен алгоритм нахождения координат центра изображения лазерного источника и проанализированы его погрешности, связанные с насыщением.

Математическая модель лазерного пучка. Было проведено компьютерное моделирование сдвига изображения пучка в плоскости матрицы. Моделируемая система состояла из точечного источника лазерного излучения, изображение которого строилось приемным объективом в плоскости матричного приемника. Сдвиг изображения обеспечивался изменением угла между оптической осью объектива и направлением на лазерный источник, а мощность сигнала при сохранении формы изображения изменялась масштабным коэффициентом. Параметры изображения описываются распределением Гаусса

$$F(x_i, y_j) = A \exp\left(-\frac{2}{w^2}(x_i^2 + y_j^2)\right), \quad (1)$$

где x_i, y_j — декартовы координаты относительно центра пучка; A — масштабный коэффициент, характеризующий плотность мощности излучения в центре пучка; w — параметр, определяющий диаметр изображения пучка.

При моделировании матричного приемника предполагали, что все ячейки имеют одинаковые геометрические размеры по строкам и столбцам, зазоры между ячейками пренебрежимо малы, а светосигнальная характеристика матрицы линейная. Интенсивность излучения на пикселе матрицы можно рассчитать по формуле

$$I_{k,l} = \frac{1}{(2d+1)^2} \sum_{i=d(k-1)+1}^{i=d(k+1)+1} \sum_{j=d(l-1)+1}^{j=d(l+1)+1} F(x_i, y_j), \quad (2)$$

где $(2d+1)$ — шаг дискретизации. Сдвиг изображения при моделировании можно выполнять с шагом $(2d+1)^{-1}$.

В модели суммарный выходной сигнал каждого пиксела определяли как сумму полезного сигнала, шумовой составляющей и постоянного уровня фона. Параметры шума могли изменяться при моделировании в соответствии с шумовыми параметрами приемника. Уровень полезного сигнала увеличивался введением коэффициента A , что соответствовало увеличению экспозиции пиксела изображения на матричном приемнике. После достижения максимума выходного сигнала дальнейший рост интенсивности приводит к насыщению, т. е. выходной сигнал перестает увеличиваться. Если полученное значение максимума оказывалось выше уровня насыщения, который в цифровых камерах соответствует верхнему пределу квантования АЦП, то в модели его принимали за максимальное значение. Модельное значение выходного сигнала можно определить следующим образом:

$$U_{k,l} = \begin{cases} (I_{k,l} + n_{k,l} + C), & (k-m)^2 + (l-n)^2 \geq w^2 \ln \frac{A}{N - n_{k,l} - C}; \\ N, & (k-m)^2 + (l-n)^2 < w^2 \ln \frac{A}{N - n_{k,l} - C}, \end{cases}$$

где k, l — координаты пиксела матрицы; $I_{k,l}$ — дискретная функция интенсивности без учета насыщения и шумов, определенная по (2); $n_{k,l}$ — составляющая шума; C — константа, соответствующая постоянному уровню фона; m, n — координаты центра пучка; N — максимальное значение сигнала на выходе матрицы (для восьмибитного АЦП $N = 255$).

В случае цифрового сигнала $U_{k,l}$ принимает целочисленные значения, при $A > (N - n_{k,l} - C)$ модельное изображение содержит насыщенные пиксели (рис. 1). Значения коэффициента A могут быть получены по максимуму коэффициента корреляции между изображениями реального и моделированного пучков или расчетным способом при сопоставлении экспозиции исследуемых насыщенных изображений с тестовым изображением без насыщения. Для привязки модели к эксперименту находили максимум корреляционной функции модельного распределения при изменении w с изображением источника в линейном режиме работы ФПМ. Коэффициент корреляции между изображением и моделью достиг максимума при $w = 1,6$ и составил 0,98. Границы изображения определялись порогом, который выбирали выше уровня шума приемника. При вычислении положения центра пучка учитывали только те пиксели, сигнал на которых превышал пороговый уровень [10].

Экспериментальная установка и методика измерений. Для изучения параметров сдвига изображения лазерного пучка была собрана установка, функциональная схема которой представлена на рис. 2. Установка содержит полупроводниковый лазер с волоконным выходом (внутренний диаметр волокна 50 мкм), работающий на длине волны 1,55 мкм. Торец волокна закреплен неподвижно в 200 мм от плоскости фотоприемной матрицы видеокамеры, имеющей объектив с фокусным расстоянием $f = 16$ мм. Изображение торца волокна проецируется объективом в плоскость ФПМ с размерами пиксела 30×30 мкм. Поскольку диаметр воло-

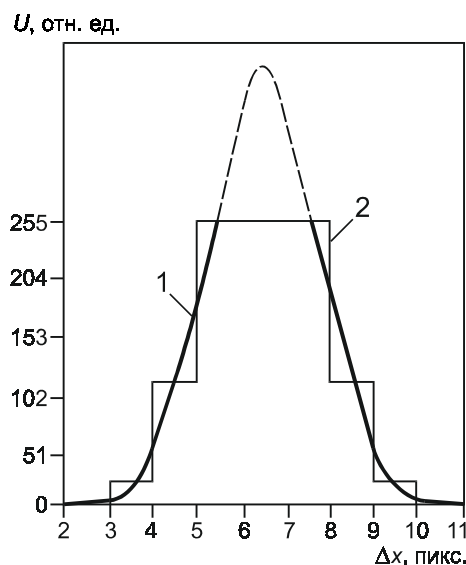


Рис. 1. Сечение модельного распределения гауссова пучка до (1) и после (2) дискретизации

на меньше абберационного кружка объектива, изображение в плоскости матрицы можно считать изображением точечного источника. Перемещение пучка в плоскости матрицы происходит путем сдвига оптического стола с размещенной на нем видеокамерой микрометрическим винтом с шагом 10 мкм. Такая конструкция установки позволяет использовать грубое перемещение оптического стола для прецизионного сдвига изображения.

При горизонтальном сдвиге камеры на n шагов изображение лазерного источника на матрице смещается вдоль строки на длину (в долях пиксела)

$$\Delta x_n = bna' / (dL), \quad (3)$$

где b — шаг перемещения; n — число шагов, определяющее размер изображения; $a' = f + z'$ — рабочий отрезок объектива (при оценках предполагаем $z' = 0$, поскольку $L \gg a'$); d — линейный размер пиксела; L — расстояние от торца волокна до плоскости матрицы.

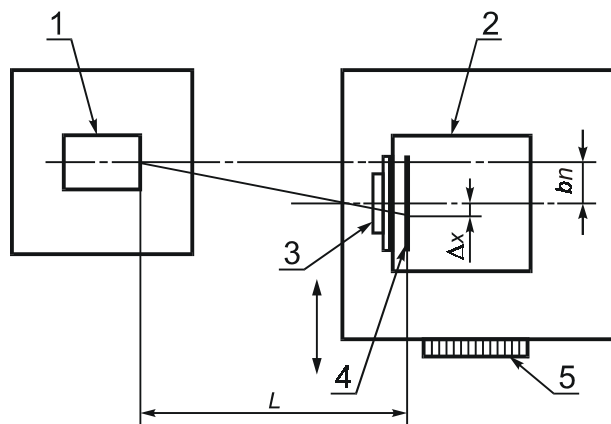


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки: 1 — лазерный диод; 2 — видеокамера; 3 — объектив видеокамеры; 4 — плоскость фотоприемной матрицы; 5 — оптический стол с микрометрическим винтом

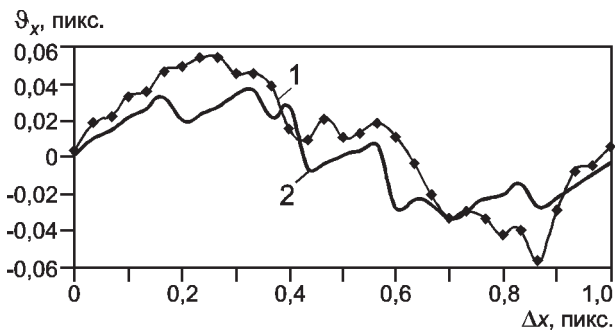


Рис. 3. Зависимости погрешности определения центра пучка от его сдвига вдоль строки ФПМ при выдержке 500 мкс:

1 — эксперимент; 2 — расчет

Размер изображения увеличивали изменением времени выдержки. В этом случае оптические параметры изображения оставались постоянными, что позволяло исключить влияние их изменений. Изменением уровня шумов при увеличении времени выдержки пренебрегали, поскольку при малых выдержках основным источником шума ФПМ является шум считывания [11].

Изменение фокусировки объектива, так же как и увеличение времени выдержки, приводит к изменению размера изображения, но при этом меняются параметры гауссова пучка. При сильной расфокусировке вершина изображения становится плоской. В течение эксперимента не допускалось отклонение от гауссовой формы распределения излучения в плоскости матрицы.

Результаты эксперимента. Предварительная обработка изображения сводилась к вычитанию постоянного уровня и калибровке чувствительности матрицы [12]. Вычитание уменьшает зону обработки, что снижает систематическую составляющую погрешности нахождения центра лазерного пучка. Оценки шумовых параметров изображения показали, что случайный шум отдельного пиксела составляет около половины единицы младшего разряда АЦП и практически не зависит от времени выдержки и уровня освещенности; по всему полю матрицы уровень шума приблизительно вдвое выше, что обусловлено влиянием геометрического шума.

Координату центра пучка в пикселах оценивали по методу взвешивания [2]:

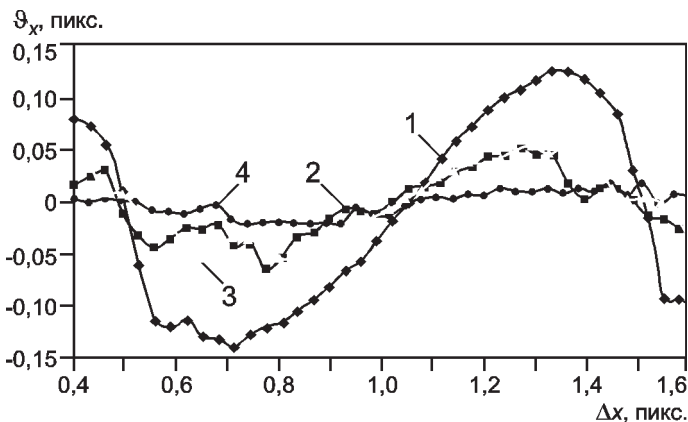


Рис. 4. Зависимости погрешности определения центра пучка от его сдвига вдоль строки ФПМ при различных выдержках:

1 — 100 мкс; 2 — 500 мкс; 3 — 1 мс; 4 — 100 мкс и расфокусировка 200 мкм

$$\hat{x}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{i_m} \sum_{j=1}^{j_m} (x_i y_j I_{i,j})}{\sum_{i=1}^{i_m} \sum_{j=1}^{j_m} (y_j I_{i,j})}; \quad \hat{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{i_m} \sum_{j=1}^{j_m} (x_i y_j I_{i,j})}{\sum_{i=1}^{i_m} \sum_{j=1}^{j_m} (x_i I_{i,j})}, \quad (4)$$

где x_i, y_j — соответственно координаты по строке i -го и столбцу j -го отсчетов; $I_{i,j}$ — нормированное значение освещенности пиксела с координатами x_i, y_j ; i_m, j_m — координаты границы окна.

Погрешность нахождения координаты центра изображения при сдвиге на n шагов вдоль строки можно оценить по формуле

$$\vartheta_x = \hat{x}_n - \hat{x}_0 - \Delta x_n, \quad (5)$$

где $\hat{x}_0, \hat{x}_n$ — оценки координаты центра изображения лазерного источника вдоль строки ФПМ до начала движения и после сдвига на n шагов, соответственно, определенные по (4); Δx_n — измеренный сдвиг вдоль строки ФПМ по (3).

Разброс положения центра пучка, определенного по (5) для последовательности изображений, полученных при одинаковых условиях (шаг перемещения равен нулю), находится в диапазоне $\pm 1/100$ пиксела. При сдвиге пучка погрешность увеличивается по периодическому закону, что, прежде всего, связано с дискретизацией изображения пикселами фотоприемной матрицы. Оценки координаты центра модельного распределения сопоставляли с результатами обработки зарегистрированных изображений (рис. 3).

Из приведенных на рис. 3 зависимостей следует, что модельное распределение достаточно точно описывает поведение изображения на матрице. Различия, вероятно, обусловлены примерно одинаковыми неоднородностями и различной чувствительностью пикселов по полю матрицы, а также случайными шумами, не учтенными в модели.

Изменение степени насыщения изображения пучка учитывали двумя методами: увеличением экспозиции, что соответствует росту энергии импульса приходящего излучения, и расфокусировкой изображения, являющейся параметром оптимизации оптической системы. Увеличивая время выдержки, можно оценить влияние повышения степени насыщения изображения на точность измерений. На рис. 4 показаны зависимости погрешности измерений координаты центра пучка от сдвига Δx при различных выдержках. Число пикселов в изображении для регистрируемого восьмимбитного изображения по порогу 10 единиц младшего разряда при различных выдержках приведено в таблице.

Зависимость погрешности определения центра пучка от выдержки

Выдержка, мкс	Число пикселов		Максимальная погрешность, пикс.
	ненасыщенных	насыщенных	
20	9	0	0,052
100	9	3	0,127
100 (расфокусировка)	20	13	0,019
500	12	9	0,055
1000	21	11	0,055

Погрешность измерений носит периодический характер, что обусловлено дискретизацией пучка при его регистрации матрицей. Как следует из рис. 4, погрешность измерений возрастает лишь на начальном этапе возникновения насыщения, в этом режиме общее число пикселей в пучке не увеличивается по сравнению с гауссовым пучком (кривая 1), а появившиеся насыщенные пиксели снижают информативность сигнала. При дальнейшем увеличении экспозиции растет число ненасыщенных пикселей, и погрешность измерений уменьшается практически до первоначального уровня. Дальнейшее увеличение экспозиции, несмотря на рост числа ненасыщенных пикселей, не приводит к повышению точности (кривая 3), поскольку наиболее информативная часть сигнала, определяющаяся областью его максимального изменения, переходит в область насыщения.

При незначительной расфокусировке изменяется параметр ширины распределения интенсивности в изображении, суммарный поток излучения остается постоянным. Для коррекции модельного распределения требуется корректировка параметров w и A в (1). Увеличение размера пучка изображения приводит к росту числа пикселей в области максимального изменения интенсивности в изображении, вследствие чего погрешность измерений координат центра пучка снижается. Согласно данным таблицы погрешность измерения расфокусированного пучка почти в шесть раз меньше полученной при тех же условиях регистрации сфокусированного пучка (см. также кривые 1, 4 на рис. 4). Увеличение выдержки сфокусированного пучка позволяет достичь практически полного совпадения размеров изображений (см. таблицу), однако даже при этих условиях расфокусированный пучок будет давать меньшую погрешность. Недостатком использования расфокусировки является снижение минимального уровня регистрируемого сигнала, что следует учитывать при разработке оптико-электронных систем. Задача оптимизации размеров пучка сводится к определению минимального размера расфокусированного пучка при измерениях для обеспечения требуемого уровня погрешности.

Заключение. Рассмотрено влияние степени насыщения выходного сигнала матричного приемника на точность определения координат центра лазерного источника. В качестве метода измерений выбран алгоритм взвешивания, широко используемый в импульсной лазерной локации. Полученные результаты показали, что погрешность определения центра пучка оказывается сравнимой с погрешностью измерения пучка без насыщения.

Существенное снижение погрешности измерений достигается незначительным смещением чувствительного элемента ФПМ из фокальной плоскости объектива. Максимальная погрешность измерения координат центра пучка, полученная в эксперименте, составила менее 1/50 пикселя.

Характер зависимости погрешности от координаты показывает, что она обусловлена, прежде всего, систематической погрешностью, связанной с шагом квантования. Амплитуда систематической составляющей зависит от размера пучка, а период связан с размером пикселя.

Разработанная модель соответствует полученным экспериментальным результатам, что позволяет оптимизировать параметры пучка для повышения точности измерений.

Л и т е р а т у р а

1. **Устинов Н. Д.** Лазерная локация. М.: Машиностроение, 1984.
2. **Welch S. S.** Effects of Window Size and Shape on Accuracy of Subpixel Centroid Estimation of Target Images. WU 590-14-11-02, NASA techn. paper 3331. Oct. 1993.
3. **Савченко Е. В., Разумов Л. А., Ринкевичюс Б. С.** Определение координат центра гауссова пучка с помощью матричного приемника методом взвешивания // Измерительная техника. 2003. № 12. С. 11—14; **Savchenko E. V., Razumov L. A., Rinkevicius B. S.** Determination of the coordinates of the center of a gaussian beam by means of a matrix photodetector using a weighting method // Measurement Techniques. 2003. V. 46. N 12. P. 1133—1137.
4. **Akondi Vyas, Roopashree M. B., Prasad B. R.** Performance of Centroiding Algorithms at Low Light Level Conditions in Adaptive Optics // Proc. Intern. Conf. Advances in Recent Technologies in Communication and Computing. Kottayam (Kerala, India), 2009. P. 366—369.
5. **Васильев Д. В.** К вопросу оптимизации корреляционных измерителей скорости // Радиотехнические тетради. М.: Изд-во МЭИ, 2000. № 20. С. 7—14.
6. **Pozin A.** Using of sub pixel line extraction methods in non-contact measure systems // Intern. Conf. Graphicon 2004. Moscow (Russia) [электронный ресурс]. <http://www.graphicon.ru> (дата обращения: 03.05.2010).
7. **Евтихиева О. А., Расковская И. Л., Ринкевичюс Б. С.** Лазерная рефрактография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
8. **Leroux C., Dainty C.** Estimation of centroid positions with a matched-filter algorithm: relevance for aberrometry of the eye // Opt. Soci. Am. Optics Express. 2010. V. 18. Iss. 2. P. 1197—1206.
9. **Червонкин А. П.** Оптическая система многоспектральной моноапертурной оптико-локационной станции самолета с динамической стабилизацией осей функциональных каналов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 2006.
10. **Гультяев А.** Визуальное моделирование в среде MATLAB: Учеб. курс. СПб.: Питер, 2000.
11. **Ohta Jun.** Smart CMOS image sensors and applications. N.Y.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.
12. **Неверова Е. А., Орлов Д. А.** Предварительная калибровка КМОП InGaAs матрицы для повышения качества изображения // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. Т. 1. С. 186.

Дата принятия 08.07.2010 г.