

Л.И. Тимченко, Ю.Ф. Кутаев, В.А. Губернаторов

Моделирование метода сечений для контроля формы изображения пятна лазерного пучка

Проанализирован метод сечений для контроля формы пятен лазерного излучения. Рассмотрена возможность использования коэффициента формы для решения поставленной проблемы. Проведены экспериментальные исследования метода сечений и коэффициента формы.

The analysis of the method of cross-sections to control the form of spots of the laser radiation is conducted. The possibility of investigating a coefficient of the form to solve the problem is considered. Experimental investigations of the methods of cross-sections and of a coefficient of the form are conducted.

Проанализовано метод перерізів для контролю форми плям лазерного випромінювання. Розглянуто можливість використання коефіцієнта форми для рішення поставленої проблеми. Проведено експериментальні дослідження методу перерізів та коефіцієнта форми.

Введение. В настоящее время в полиграфии, лазерной обработке материалов, локации, оптической связи и других областях техники ощущается необходимость более широкого внедрения оптико-электронных систем с автоматической корректировкой искажений формируемого светового излучения. Причинами этих искажений могут быть дестабилизирующее воздействие механических или климатических факторов, нестабильность характеристик источника излучения, возмущения в оптическом тракте, разъюстировка оптических элементов и т.п. Обеспечение приемлемого качества коррекции требует непрерывного динамического контроля характеристик светового излучения, например пространственного распределения его интенсивности, в том числе оценки отклонения указанного распределения от исходного или эталонного распределения.

Цель статьи – разработка метода выборки и последующей обработки формы поверхности пятна излучения в реальном времени.

Приближенная классифицирующая функция

Традиционный путь решения данной задачи включает формирование изображения пятна излучения $B(x, y)$ на светочувствительной поверхности фотоприемника с последующим преобра-

зованием в сигнал $U(x, y)$, амплитуда которого в каждой точке разложения с координатами (x, y) соответствует интенсивности в $B(x, y)$, т.е. $U(x, y) \leftrightarrow B(x, y)$. Далее сигнал $U(x, y)$ сравнивают с эталонным сигналом $W(x, y)$ для всех точек разложения сигналов. Сигналы $U(x, y)$ и $W(x, y)$ представляют собой некоторые поверхности, которые могут отличаться типом, коэффициентом относительного масштаба, вектором относительной координатной привязки и углами относительных поворотов в трехмерном пространстве. Поэтому сравнение этих поверхностей должно проводиться с учетом всех возможных ситуаций, что требует огромного объема вычислений и затруднительно для осуществления в реальном времени.

В практически важных случаях требуемое сравнение поверхностей $U(x, y)$ и $W(x, y)$ может быть реализовано с помощью нового метода сечений. Этот метод включает следующие операции:

- нахождение максимальных амплитуд сигналов $U(x, y)$ и $W(x, y)$ (рис. 1):

$$U_{\max} = \max U(x, y) = h_u,$$

$$W_{\max} = \max W(x, y) = h_w;$$

- нахождение значений площадей $S_{0,75u}$ и $S_{0,5u}$ сечений на уровнях $0,75 h_u$ и $0,5 h_u$ для

сигнала $U(x, y)$ соответственно, $S_{0,75w}$ и $S_{0,5w}$ на уровнях $0,75 h_w$ и $0,5 h_w$ для сигнала $W(x, y)$ соответственно;

• расчет приближенных значений коэффициентов формы $\tilde{r}_{v,u}$ и $\tilde{r}_{v,w}$ для сигналов $U(x, y)$ и $W(x, y)$ соответственно;

$$r_{v,u} \approx \tilde{r}_{v,u} = r_{s,u} = S_{0,75u} / S_{0,5u}, \quad (1)$$

$$r_{v,w} \approx \tilde{r}_{v,w} = r_{s,w} = S_{0,75w} / S_{0,5w}, \quad (2)$$

где \sim – знак приближенного значения,

$$r_{v,u} = V_{0,5u} / h_u S_{0,5u}, \quad 0 < r_{v,u} \leq 1, \quad (3)$$

$$r_{v,w} = V_{0,5w} / h_w S_{0,5w}, \quad 0 < r_{v,w} \leq 1, \quad (4)$$

$V_{0,5u}$ и $V_{0,5w}$ – суммарное значение амплитуд сигналов $U(x, y)$ и $W(x, y)$, меньших уровней $0,5 h_u$ и $0,5 h_w$ соответственно.

Покажем справедливость $r_v \approx r_s$ на примере текущего сигнала $U(x, y)$ следующим образом.

Объем $\tilde{V}_{0,5u}$ фигуры выше сечения поверхности $U(x, y)$ по уровню $0,5 h_u$ может быть найден с помощью одной из известных формул приближенного вычисления интегралов для равноотстоящих узловых точек, например, формулы Симпсона [1]:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{0,5u} &\approx h_u [S(U_{\max}) + 4S_{0,75u} + S_{0,5u}] / 12 \approx \\ &\approx h_u S_{0,5u} (4r_{s,u} + 1) / 12. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как $S(U_{\max}) = S_{1u}$ – площадь сечения поверхности на уровне максимальной амплитуды, при этом чаще всего $S_{1u} \approx 0$.

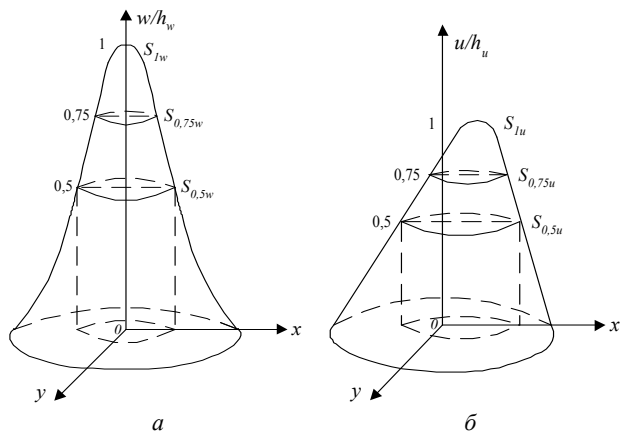


Рис. 1. Сигналы изображения пятна излучения: а – эталонного; б – текущего

• сравнение коэффициентов формы $r_{s,u}$ и $r_{s,w}$ (вместо поэлементного сравнения поверхностей).

Используя (5), легко получить

$$V_{0,5u} = \tilde{V}_{0,5u} + h_u S_{0,5u} / 2 \approx h_u S_{0,5u} (4r_{s,u} + 7) / 12, \quad (6)$$

откуда следует

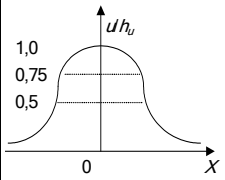
$$\tilde{r}_{v,u} \approx (4r_{s,u} + 7) / 12. \quad (7)$$

Линейная зависимость коэффициентов \tilde{r}_v и r_s позволяет использовать коэффициент r_s как характеристику формы соответствующей поверхности.

Возможности классификации типов поверхностей посредством коэффициента r_s отражены в таблице. Разные значения коэффициента

Таблица. Профиль продольного сечения

Рисунок продольного сечения	Значения коэффициента			Значение погрешности δr_v
	r_s	\tilde{r}_v	r_v	
1. Призма, цилиндр 	1	$11/12 \approx 0,92$	1	$1/12 \approx 0,083$
2. Пирамида, конус 	$1/4 = 0,25$	$2/3 \approx 0,67$	$2/3 \approx 0,67$	0
3. Полушар 	$7/12 \approx 0,58$	$7/9 \approx 0,78$	$7/9 \approx 0,78$	0
4. Полушар с основанием 	$3/4 = 0,75$	$5/6 \approx 0,83$	$5/6 \approx 0,83$	0

<p>5. Гауссоида $(1/\sqrt{2\pi})\exp\{-(x^2+y^2)/2\}$</p> 	$\ln(4/3)/\ln 2 \approx 0.415$	$8.66/12 \approx 0.722$	$1/2 \ln 2 \approx 0.721$	≈ 0
--	--------------------------------	-------------------------	---------------------------	-------------

r_s соответствуют разным типам поверхностей приведенных в ней примеров фигур.

Достоинством коэффициента r_s для некоторых типов поверхностей является его независимость от коэффициента масштаба, сдвига и ориентации соответствующей поверхности, а также вычисление коэффициента r_s , так как число разрядов кода значения $S_{0,5}$ всегда существенно меньше числа разрядов кода значения $V_{0,5}$.

Коэффициент $4r_s$ характеризует обобщенную выпуклость поверхности: при $4r_s > 1$ – поверхность выпукла, при $4r_s < 1$ – поверхность плоская в обобщенном смысле, при $4r_s = 1$ – поверхность линейна.

Важно отметить, что поверхность можно охарактеризовать площадью эффективного сечения S_3 :

$$S_3 = 2(V_{0,5} - S_{0,5} \cdot h \cdot 0,5) / h \approx \approx 2(S_{0,5} \tilde{r}_v h - S_{0,5} \cdot h \cdot 0,5) / h = 2S_{0,5}(\tilde{r}_v - 0,5), \quad (8)$$

откуда

$$S_3 \approx \tilde{S}_3 = \begin{cases} (4S_{0,75} + S_{0,5})/6 \text{ при } S_1 \approx 0, \\ (S_1 + 4S_{0,75} + S_{0,5})/6 \text{ при } S_1 \neq 0, \end{cases} \quad (9)$$

где S_1 – площадь сечения сигнала на его максимальном уровне.

Метод сечений [2] можно использовать для выборки сигналов лазерных пучков, а в качестве параметра выборки использовать коэффициент формы, при этом данная методика будет использоваться для нахождения центров лазерных пучков.

Алгоритм заключается в следующем:

1. На изображении находится точка с максимальной яркостью.
2. От найденного значения яркости на изображении выбираются пять значений яркости, каждое на единицу меньше от предыдущего. Крайние точки каждого из шести диапазонов образуют краевые линии. В результате получается шесть краевых линий.

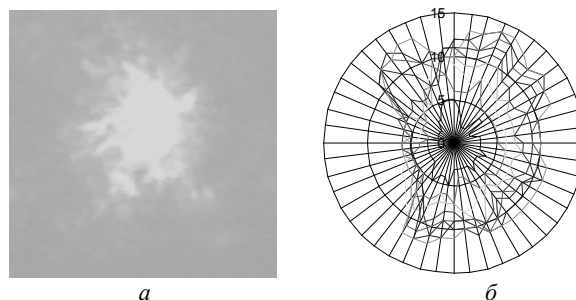


Рис. 2. Форма пятна лазерного пучка: а – фото с камеры; б – схематический рисунок

3. Для каждого краевого контура определяется предварительный центр, после чего вычисляется усредненный центр для координат X и Y .

Координаты (x,y) энергетического центра двумерного сигнала с удельной нелинейной плотностью $w(f(x,y))$, соответствующей данному значению $f(x,y)$, выражаются в следующем виде:

$$x = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)) \times x, \quad y = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)) \times y, \quad M = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)).$$

4. Полученные краевые линии разбиваются на четыре сегмента. В качестве центральной точки используются координаты предварительного центра (усредненного центра).

5. Определяются «хорошие» и «плохие» изображения по факту попадания в рассчитанный туннель вычисленного коэффициента формы. Если коэффициент формы текущего изображения попадает в туннель, то последнее считается «хорошим», в противном случае – «плохим». Границы туннеля вычисляются в обучаемой выборке изображений путем последовательного выбора изображений и соответствующих коэффициентов формы с минимальным разбросом координат предварительных центров.

6. Вычисляются координаты энергетических центров только для «оптимальных» изображений.

Результаты экспериментальных исследований

Исследовано 15 трасс лазерных пучков [3] и получены следующие результаты (показано для двух трасс):

- Границы туннеля $a := 0,777$, $b := 0,78$.

Значение разницы между максимальным и минимальным значением координат – 1,147.

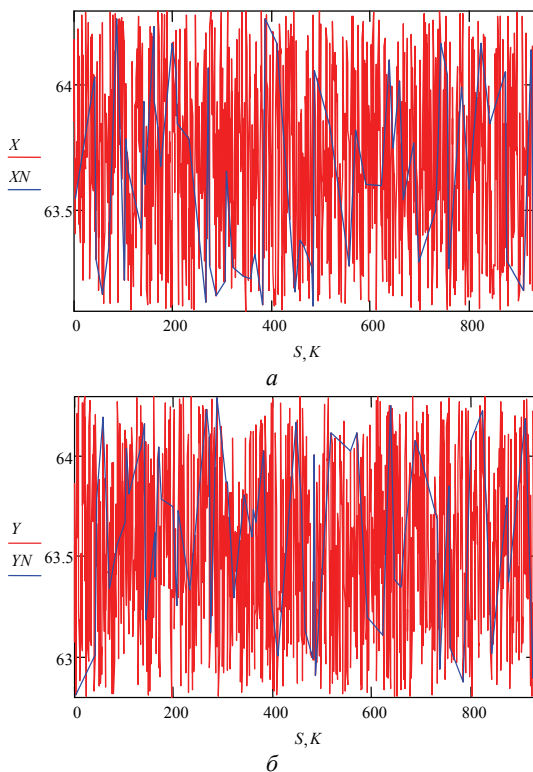


Рис. 3. График распределения координат центров лазерных пучков, где X , Y – координаты всей трассы лазерных пучков соответственно, XN , YN – значения координат центров пятен после выборки: a – значение X ; $б$ – значение Y

- Границы туннеля $a := 0,751$, $b := 0,757$.

Значение разницы между максимальным и минимальным значением координат – 2,18.

Заключение. Эксперименты показывают, что для изображений пятен лазерных пучков в результате действия разнообразных дестабилизирующих факторов невозможно точно измерять координаты их энергетических центров, однако точность можно существенно повысить, используя вычисление коэффициента формы изображений с последующей их классификацией на «хорошие» и «плохие». Сравнительный ана-

лиз показывает, что предложенные методы позволяют измерять координаты центра лазерных изображений с точностью определения точки привязки не менее чем 1–2 элемента разложения, что по точности превышает известные, например, на основе определения центра масс с помощью моментных признаков, в среднем в 1,5 раза.

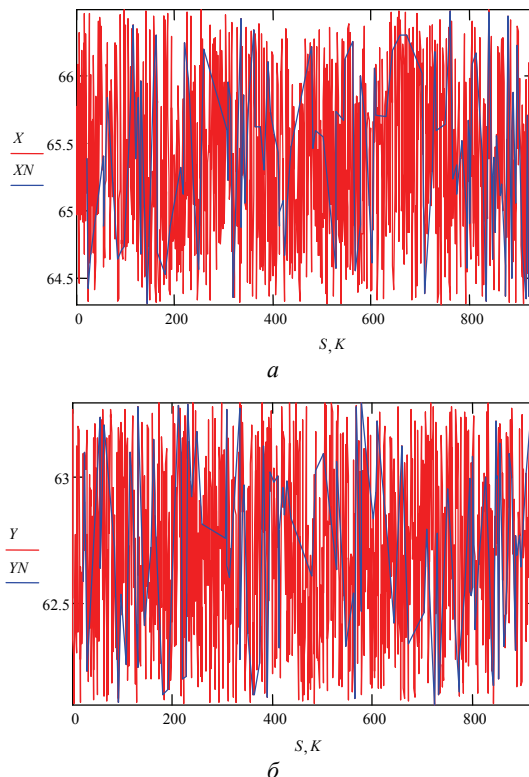


Рис. 4. График распределения координат центров лазерных пучков, где X , Y – координаты всей трассы лазерных пучков соответственно, XN , YN – значения координат центров пятен после выборки: a – значение X ; $б$ – значение Y

В соответствии с изложенным методом сечений сравнение поверхностей сводится к сравнению их коэффициентов формы и не требует поэлементного сравнения с учетом всех случаев отличия их типов, коэффициента масштаба, относительного сдвига и поворота в пространстве. Важно отметить, что равенство коэффициентов формы поверхностей в общем случае позволяет отнести их к одному и тому же обобщенному типу поверхности или аппроксимировать этим типом поверхности.

Очевидно, что метод сечений может быть легко распространен на случай увеличения числа равноотстоящих сечений поверхности или

изменения значений уровней сечений, изменения весовых коэффициентов площадей сечений.

При этом в качестве порождающей основы также целесообразно использовать подходящую формулу приближенного вычисления интегралов [1].

Рассмотренный метод сечений перспективен также для применения в задачах классификации и архивации изображений в реальном времени. Достоинство данного метода – простота осуществления как программными, так и аппаратными средствами.

1. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* – Довідник по математиці. – М.: Наука, 1986. – 507 с.
2. *Кутаев Ю.Ф., Сидоров А.С.* Метод фильтрации геометрического шума бинарного изображения / Сб. науч. тр. «Информационная и микропроцессорная

техника в полиграфии». – М.: Изд-во МПИ «Мир книги», 1992. – С. 57–73.

3. *Laser Control of Near Earth Space and Possibilities for Removal of Space Debris from Orbit with Explosive Photo-Dissociation Lasers with Phase Conjugation* / N.G. Basov, E.M. Zemskov, Y.F. Kutaev et. al. // Proc. GCL/HPL 98. SPIE Symp. St-Petersburg, Russia 1998. – P. 156–158.
4. *Тимченко Л.И., Кутаев Ю.Ф., Герцуй А.А.* Система координатной привязки для нестационарных сигналов // Изв. РАН. Сер. физическая. – 2001. – № 6. – С. 886–890.
5. *Timchenko L.I., Kutaev Yu.F.* Method for Training of a Parallel-Hierarchical Network, Based on Population Coding for Processing of Extended Laser Paths Images // Proc. of SPIE. – 2002. – 4790. – P. 465–479.

Поступила 21.02.2010

Тел. для справок: (044) 465-4282 (Киев), 098-451-8834

E-mail: pontiw@rambler.ru

© Л.И. Тимченко, Ю.Ф. Кутаев, В.А. Губернаторов, 2010

Правила подготовки материалов

К рассмотрению принимаются не опубликованные ранее работы по тематике, приведенной на второй странице обложки журнала. Все статьи рецензируются. Решение редколлегии по содержанию каждого номера журнала утверждается ученым советом МНУЦИТиС. Одобренные к печати материалы редактируются. В случае отклонения рукописи один экземпляр и рецензия возвращаются автору. В одном номере журнала публикуется только одна статья автора, в том числе и в соавторстве.

В редакцию необходимо представить:

1. Рукопись (2 экз.), напечатанную через два интервала, объемом не более 16 страниц, на одной стороне листа формата А4 (кегель 12). Один экземпляр должен быть подписан автором(ами).

Страницы оригинала должны быть пронумерованы и иметь поля: левое – 25 мм, правое – 10 мм, верхнее – 20 мм, нижнее – 25 мм.

2. Аннотацию (2 экз.), напечатанную на отдельной странице (до 5 строк) с указанием фамилии автора(ов) и названия статьи на русском, украинском и английском языках; через два интервала.

3. Сопроводительное письмо организации за подписью руководителя.

4. Дискету 3,5" с текстом статьи, аннотацией и иллюстрациями.

5. Сведения об авторе(ах) – фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, должность, адрес, телефон, факс, e-mail.

6. Копию квитанции о подписке на журнал УСиМ (не менее чем на полгода).

В начале статьи необходимо указать индекс УДК. Используемая литература приводится общим списком в конце статьи в порядке упоминания. Графики, рисунки и таблицы с подписями должны быть распечатаны на отдельных страницах либо выполнены тушью для сканирования.

Для подготовки текста на дискете необходимо использовать редактор *Microsoft Word* любой версии (шрифт *Times New Roman*; кегль 12, интервал двойной; отступ 1 см.), для набора формул – редактор *Microsoft Equation Editor v. 2.0/3.0* из состава *Microsoft Office*. Иллюстрации могут быть выполнены в любом графическом редакторе.

Материалы можно высылать электронной почтой (по адресу gor15@yandex.ru) с обязательным дублированием на бумаге в двух экземплярах или почтой (простое письмо).

В соответствии с постановлением президиума ВАК Украины от 15.01.2003 г. № 7-05/1 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України» статьи, принимаемые к опубликованию, должны состоять из следующих элементов:

- постановка проблемы и ее связь с научными или практическими заданиями;
- анализ последних исследований и публикаций (где начато разрешение данной проблемы), на которые опирается автор;
- выделение неразрешенной части общей проблемы, чему посвящена предлагаемая статья;
- формулировка цели статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследований с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы из данного исследования и перспективы дальнейших разработок в данном направлении.

Редакция обращается с просьбой к авторам, желающим опубликовать статью в нашем журнале на украинском или английском языке, прилагать к направляемым материалам русский аналогичный вариант текста.

Редколлегия