

# ВАКУУМНАЯ И ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.373.826

## ОПТО-АКУСТИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

М. И. Дзюбенко, С. Н. Колпаков, Д. Ф. Кулишенко, А. А. Приёмко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: ire@ire.kharkov.ua*

Рассмотрен разработанный авторами опто-акустический метод фокусировки лазерного излучения на поверхность изделия при лазерной размерной обработке. Представлен алгоритм слежения за фокусом в процессе гравировки и резки материала. Алгоритм основан на измерении геометрической формы поверхности изделия. Представлены результаты экспериментальной проверки разработанного метода. Показана его практическая реализуемость и технологическая эффективность. Ил. 4. Библиограф.: 6 назв.

**Ключевые слова:** опто-акустика, фокусировка, лазерное излучение.

Лазерная размерная обработка предполагает точную фокусировку излучения на обрабатываемую поверхность. Существуют две схемы размерной обработки: луч движется относительно неподвижной поверхности; поверхность движется относительно неподвижного луча. Как правило, в одном и другом случаях идеально выполнить операцию поддержания поверхности в фокусе выходного объектива невозможно по следующим причинам:

- плоскость обрабатываемой поверхности не параллельна плоскости объектива, фокусирующего излучение;
- в процессе обработки происходит термическая деформация поверхности;
- глубина фокуса ограничивает кривизну обрабатываемой поверхности.

Для уменьшения влияния этих причин в основном используют увеличение глубины фокуса за счёт увеличения фокусного расстояния объектива. Это приводит к увеличению диаметра пятна, что снижает плотность мощности и, как следствие, приводит к необходимости использования более мощных лазеров. В результате стоимость лазерной системы обработки резко увеличивается.

Второй, практически реализованный метод, решающий эту задачу, основан на триангуляционном измерении расстояния от объектива до обрабатываемой поверхности. Однако он хорошо работает только при обработке плоских поверхностей. Кроме того, при лазерной резке практически невозможно следить за фокусом в процессе обработки из-за нестабильной яркости факела, возникающего при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью.

Для решения задачи фокусировки лазерного излучения на криволинейную обрабатываемую поверхность и удержания фокуса в процессе обработки нами был предложен и реализован метод, основанный на возбуждении акустического

излучения при взаимодействии оптического излучения с веществом. Этот метод позволил реализовать алгоритм фокусировки, основанный на предварительном измерении геометрической формы обрабатываемой поверхности и привязки её к системе координат выходного объектива, что существенно ускорило технологический процесс размерной обработки и сделало возможным позиционировать изображение (линии гравировки) относительно объекта, а не наоборот. В результате, отпала необходимость в прецизионной предварительной установке объекта, что существенно повысило технологичность лазерных систем. Кроме этого, метод позволил следить за фокусом в процессе обработки.

Нами описан опто-акустический метод фокусировки и алгоритм предварительного измерения геометрической формы, обрабатываемой поверхности.

**Теоретическая часть.** Взаимодействие сфокусированного лазерного луча с поверхностью приводит к возникновению оптического и акустического излучения (рис. 1).

Принцип действия опто-акустического метода основан на различной скорости распространения оптической и акустической волн.

Акустический импульс имеет задержку относительно оптического импульса на время  $\tau$  (рис. 2).

Величина этой задержки соответствует времени, за которое акустический сигнал проходит расстояние между точкой взаимодействия лазерного излучения с поверхностью и акустическим приёмником. Включение дальномера в обратную связь системы фокусировки позволяет постоянно держать обрабатываемую поверхность в фокусе лазерного излучения. Подобный алгоритм поддержания фокуса может быть использован при небольшой скорости размерной обработки, например, при лазерной резке.

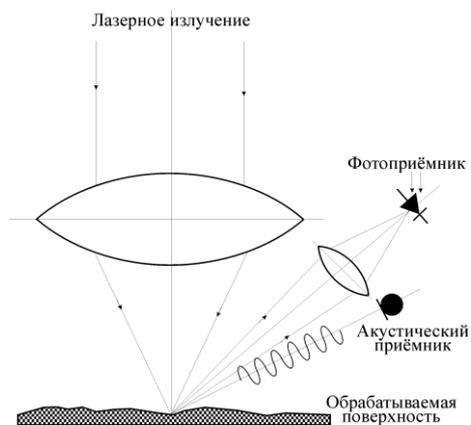


Рис. 1. Схема фокусировки

В случае же лазерной гравировки скорость движения луча по поверхности на порядок больше. Поэтому обработка измерительной информации существенно замедляет технологический процесс.

В этом случае сначала измеряется геометрическая форма обрабатываемой поверхности, а затем, уже с имеющейся информацией о положении фокуса в каждой точке, запускается процесс гравировки.

Уравнение геометрической формы обрабатываемой поверхности получается путём измерения координат точек освещения. Пространственная форма любого объекта характеризуется порядком её кривизны [1, 2]. Этот параметр определяет геометрически минимальное количество точек, координаты которых однозначно задают поверхность. Например, уравнение поверхности первого порядка (плоскости) однозначно определяется координатами трёх точек, второго порядка – координатами девяти точек и т. д. Таким образом, для вычисления коэффициентов уравнения необходимо решить систему или вычислить определитель матрицы.

Геометрическая форма изделий во многих случаях задаётся уравнениями поверхностей, имеющих кривизну второго порядка.

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0. \quad (1)$$

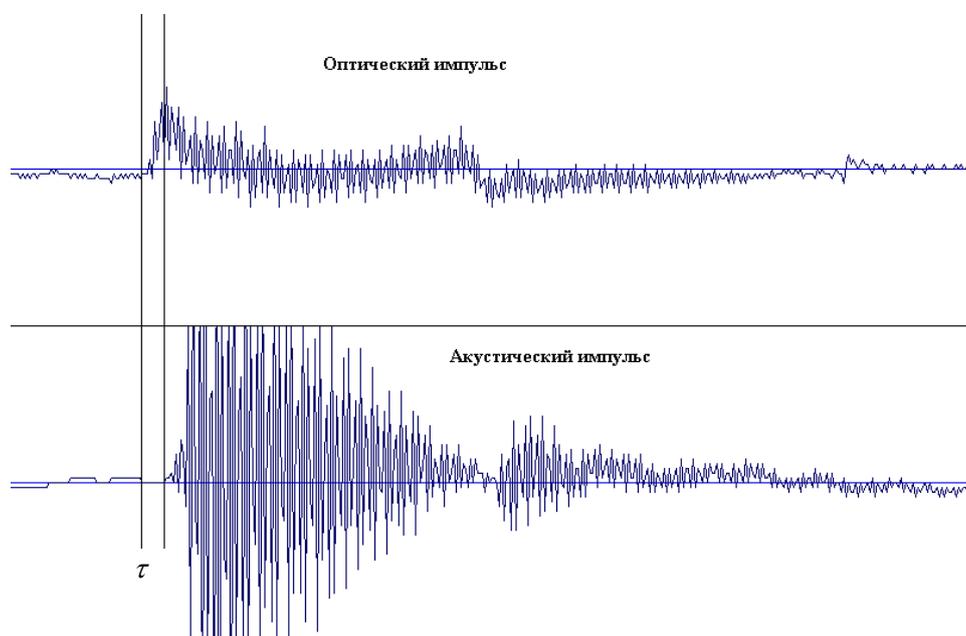


Рис. 2. Задержка акустического импульса относительно оптического (время задержки  $\tau = 0,17\text{мс}$ )

Как правило, коэффициенты уравнения (1) нормируются относительно свободного члена, поэтому  $a_{44}=1$ . Для вычисления остальных

девяти коэффициентов решается система из девяти уравнений.

$$\begin{cases} a_{11}x_1^2 + a_{22}y_1^2 + a_{33}z_1^2 + 2a_{12}x_1y_1 + 2a_{13}x_1z_1 + 2a_{23}y_1z_1 + 2a_{14}x_1 + 2a_{24}y_1 + 2a_{34}z_1 + 1 = 0, \\ a_{11}x_2^2 + a_{22}y_2^2 + a_{33}z_2^2 + 2a_{12}x_2y_2 + 2a_{13}x_2z_2 + 2a_{23}y_2z_2 + 2a_{14}x_2 + 2a_{24}y_2 + 2a_{34}z_2 + 1 = 0, \\ a_{11}x_3^2 + a_{22}y_3^2 + a_{33}z_3^2 + 2a_{12}x_3y_3 + 2a_{13}x_3z_3 + 2a_{23}y_3z_3 + 2a_{14}x_3 + 2a_{24}y_3 + 2a_{34}z_3 + 1 = 0, \\ a_{11}x_4^2 + a_{22}y_4^2 + a_{33}z_4^2 + 2a_{12}x_4y_4 + 2a_{13}x_4z_4 + 2a_{23}y_4z_4 + 2a_{14}x_4 + 2a_{24}y_4 + 2a_{34}z_4 + 1 = 0, \\ a_{11}x_5^2 + a_{22}y_5^2 + a_{33}z_5^2 + 2a_{12}x_5y_5 + 2a_{13}x_5z_5 + 2a_{23}y_5z_5 + 2a_{14}x_5 + 2a_{24}y_5 + 2a_{34}z_5 + 1 = 0, \\ a_{11}x_6^2 + a_{22}y_6^2 + a_{33}z_6^2 + 2a_{12}x_6y_6 + 2a_{13}x_6z_6 + 2a_{23}y_6z_6 + 2a_{14}x_6 + 2a_{24}y_6 + 2a_{34}z_6 + 1 = 0, \\ a_{11}x_7^2 + a_{22}y_7^2 + a_{33}z_7^2 + 2a_{12}x_7y_7 + 2a_{13}x_7z_7 + 2a_{23}y_7z_7 + 2a_{14}x_7 + 2a_{24}y_7 + 2a_{34}z_7 + 1 = 0, \\ a_{11}x_8^2 + a_{22}y_8^2 + a_{33}z_8^2 + 2a_{12}x_8y_8 + 2a_{13}x_8z_8 + 2a_{23}y_8z_8 + 2a_{14}x_8 + 2a_{24}y_8 + 2a_{34}z_8 + 1 = 0, \\ a_{11}x_9^2 + a_{22}y_9^2 + a_{33}z_9^2 + 2a_{12}x_9y_9 + 2a_{13}x_9z_9 + 2a_{23}y_9z_9 + 2a_{14}x_9 + 2a_{24}y_9 + 2a_{34}z_9 + 1 = 0. \end{cases}$$

В этой системе уравнений  $x_i, y_i, z_i$  координаты точек, полученные с помощью опто-акустического дальномера.

Другим способом задания поверхности второго порядка по девяти точкам является вычисление определителя в уравнении.

$$\begin{vmatrix} x^2 & xy & y^2 & yz & z^2 & xz & x & y & z & 1 \\ x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & y_1z_1 & z_1^2 & x_1z_1 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & y_2z_2 & z_2^2 & x_2z_2 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 & y_3z_3 & z_3^2 & x_3z_3 & x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4^2 & x_4y_4 & y_4^2 & y_4z_4 & z_4^2 & x_4z_4 & x_4 & y_4 & z_4 & 1 \\ x_5^2 & x_5y_5 & y_5^2 & y_5z_5 & z_5^2 & x_5z_5 & x_5 & y_5 & z_5 & 1 \\ x_6^2 & x_6y_6 & y_6^2 & y_6z_6 & z_6^2 & x_6z_6 & x_6 & y_6 & z_6 & 1 \\ x_7^2 & x_7y_7 & y_7^2 & y_7z_7 & z_7^2 & x_7z_7 & x_7 & y_7 & z_7 & 1 \\ x_8^2 & x_8y_8 & y_8^2 & y_8z_8 & z_8^2 & x_8z_8 & x_8 & y_8 & z_8 & 1 \\ x_9^2 & x_9y_9 & y_9^2 & y_9z_9 & z_9^2 & x_9z_9 & x_9 & y_9 & z_9 & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Рассмотрим математическую постановку задачи восстановления уравнения пространственной формы обрабатываемой поверхности. Система координат, в которой проводятся измерения, задаётся плоскостью объектива, фокусирующего лазерное излучение, и его оптической осью. В случае неподвижного луча лазера при измерении координат точек на поверхности следует учитывать только угол  $\alpha$  между оптической осью объектива (она же ось ординат) и направлением, соединяющим центр объектива (он же начало координат) и акустический приёмник (рис. 3).

В треугольнике ABC длина стороны  $b$  и угол  $\alpha$  фиксированы, измеряется длина стороны  $c$ , т. е. необходимо решить треугольник с двумя известными сторонами и углом. В частном случае, когда акустический приёмник находится в

плоскости линзы  $\alpha = 90^\circ$ , задача сводится к нахождению катета по гипотенузе и второму катету.

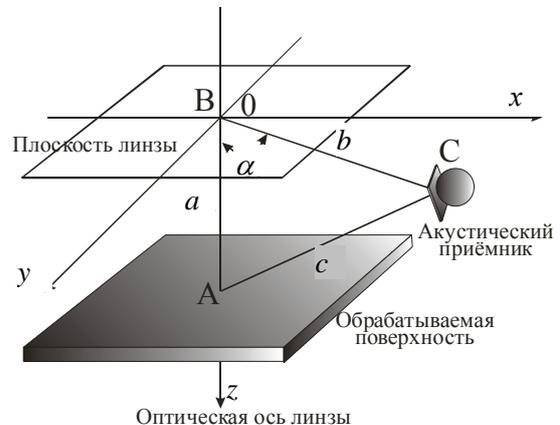


Рис. 3. Математическая постановка задачи измерения геометрической формы

Вычисленное расстояние  $\alpha$  есть не что иное как координата  $z$  точки на поверхности. Две другие координаты задаются системой перемещения обрабатываемого изделия.

При движении луча относительно поверхности по заданной траектории (рис. 4) известными параметрами являются координаты приёмника и направляющие углы луча  $\gamma, \beta, \zeta$ ;  $\alpha$  - угол между лучом и направлением на акустический приёмник;  $a, b, c$  - длины сторон треугольника с вершинами в начале координат, точке падения луча на поверхность и точке расположения акустического приёмника.

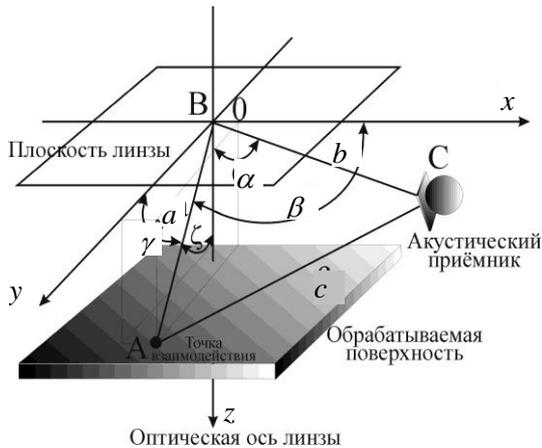


Рис. 4. Математическая постановка задачи измерения геометрической формы

В этом случае координаты точки взаимодействия вычисляются по формуле [3]

$$\begin{bmatrix} -0,005272969064x + 1,000000000 - 0,0005063313154z - 0,006269421481y \\ -0,003588941102x + 1,000000000 - 0,0007113832089z - 0,005386220673y \\ -0,005028884834x + 1,000000000 - 0,0004089561136z - 0,006131872985y \\ -0,003499904828x + 0,999999999 - 0,0003397723382z - 0,005413435694y \\ -0,005306898283x + 1,000000000 - 0,0004668932436z - 0,006315278040y \\ -0,005497215296x + 0,9999999998 - 0,0006191204969z - 0,006355405713y \end{bmatrix}$$

Следующим этапом эксперимента была проверка того, что измеренная поверхность является плоскостью. Для этого на основании вычисленных координат девяти точек освещения уравнение

$$2,2 \cdot 10^{-5} x^2 + 6,9 \cdot 10^{-5} y^2 + 10^{-5} z^2 + 5,4 \cdot 10^{-5} xy - 3,6 \cdot 10^{-5} xz - 5,1 \cdot 10^{-5} yz - 4,6 \cdot 10^{-3} x - 5,7 \cdot 10^{-3} y - 4,9 \cdot 10^{-4} z + 1 = 0$$

Из этого уравнения видно, что коэффициенты при  $x, y, z$  на два порядка больше, чем коэффициенты при остальных переменных. Поэтому

$$d = \sqrt{c^2 + b^2 + 2bc \cos \left( \beta + \arcsin \left[ \frac{b}{c} \sin \beta \right] \right)} \cos \gamma,$$

где  $c$  - измеренное расстояние.

**Эксперимент.** Эксперименты проводились на серийной установке для лазерной гравировки. В ней используется волоконный лазер мощностью 10 Вт. В качестве фотоприёмника был использован фотодиод с фокусирующим объективом. Акустический приёмник был построен на основе пьезокерамического элемента. Экспериментальная проверка разработанного метода проводилась по следующему алгоритму [4]:

- плоская поверхность устанавливалась в заданное известное положение, определяемое уравнением в выбранной системе координат;
- с помощью опто-акустического метода измерялись координаты девяти точек на поверхности;
- на основании измеренных координат был найден ряд уравнений плоскости;
- была проведена проверка того, что измеренная геометрическая форма представляет собой плоскость.

Положение плоской поверхности в пространстве соответствовало уравнению  $0,05x + 0,006y + 0,0004z - 1 = 0$ .

С использованием координат девяти точек получено 84 уравнения плоскости, некоторые из них приведены ниже.

плоскости восстанавливалось как уравнение поверхности второго порядка. В результате получилось следующее уравнение геометрической формы измеренной поверхности:

данное уравнение можно считать уравнением плоскости, а измеренную геометрическую форму поверхности - поверхностью первого порядка.

Для оценки погрешности измерения были использованы углы [5, 6]:

- между плоской поверхностью и плоскостью  $XOZ$ ;
- между измеренными плоскостями;
- между измеренными плоскостями и истинной плоскостью.

Угол между истинной плоскостью и  $XOZ$  равен  $140,1^\circ$ . Среднее значение этого угла, вычисленное на основании коэффициентов полученных уравнений плоскостей  $141,9^\circ$ , среднее квадратическое отклонение  $3,2^\circ$ .

Значения углов между плоскостями (2) представлены в виде матрицы

0,0	6,928480	0,9192456	7,189389	0,2988186	1,041160
6,928435	0,0	6,562487	3,349903	7,030192	7,442391
0,9192456	6,562487	0,0	6,464046	0,7426434	1,960248
7,189389	3,349903	6,464046	0,0	7,150555	8,048705
0,2977179	7,030192	0,7426434	7,150600	0,0	1,270908
1,041160	7,442350	1,960248	8,048705	1,270650	0,0

Ниже приведены значения углов между этими же плоскостями и истинным положением плоскости

[0,6587805, 6,962405, 0,4504203, 6,913264, 0,3877540, 1,657481].

Абсолютная погрешность измерения расстояния опто-акустическим методом, реализованным на экспериментальной установке, составила 40 мкм, относительная – 1,4 %.

**Выводы.** Проведенные эксперименты подтвердили практическую реализуемость и технологическую эффективность разработанного опто-акустического метода фокусировки лазерного излучения и возможность его интегрирования в уже имеющиеся лазерные системы.

1. Александров П. С. Лекции по аналитической геометрии. - М.: Наука, 1968. - 912 с.
2. Мусхелишвили Н. И. Курс аналитической геометрии. - М.: ОГИЗ, 1947. - 644 с.
3. Приёмко А. А. Пространственные параметры спекл-поля в восстановлении конфигурации // Технология приборостроения. - 2001. - №1-2. - С.56-60.
4. Приёмко А. А. Контроль конфигурации глисады // Авиационно-космическая техника и технология. - Харьков, ХГАКУ «ХАИ». - 2001. - 22. - С.312-318.
5. Приёмко А. А. Спекл-метод восстановления конфигурации цилиндрической поверхности // Материалы научно-технической конференции «Радиотехнические системы летательных аппаратов», Харьков, ХГАКУ «ХАИ». - 1999. - С.26-31.
6. Дзюбенко М. И., Пелипенко В. П., Колпаков С. Н., Приёмко А. А. Использование динамических свойств спеклов для позиционирования плоской поверхности // Физическая инженерия поверхности. - 2003. - 1, №2. - С.174-179.

#### OPTIC-ACOUSTIC FOCUSING OF LASER RADIATION ON A WORK SURFACE

M. Dzjubenko, S. Kolpakov,  
D. Kulishenko, O. Priyomko

The optic-acoustic method, developed by the authors, of a focusing of laser radiation on a surface of an item is considered at laser dimensional processing. The algorithm of tracking behind a focal point in process engrave is shown and are sharp of a material. The algorithm is based on measurement of the geometric form of a surface of an item. The outcomes of experimental check of the developed method are shown. The practical marketability and technological efficiency is shown it.

**Key word:** optic-acoustic, focusing, laser radiation.

#### ОПТО-АКУСТИЧНЕ ФОКУСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПОВЕРХНЮ, ЩО ОБРОБЛЮЄТЬСЯ

М. І. Дзюбенко, С. М. Колпаков,  
Д. Ф. Кулішенко, О. О. Приймко

Розглянуто розроблений авторами опто-акустичний метод фокусування лазерного випромінювання на поверхню виробу за лазерної розмірної обробки. Подано алгоритм стеження за фокусом у процесі гравірування і різання металу. Алгоритм засновано на вимірюванні геометричної форми поверхні виробу. Подано результати експериментальної перевірки розробленого методу. Показана можливість його практичної реалізації та технологічна ефективність.

**Ключові слова:** опто-акустика, фокусування, лазерне випромінювання.

Рукопись поступила 27 февраля 2007 г.