

УДК 681.7.068.4

А.И. ФИЛИПЕНКО

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ИХ СОЕДИНЕНИИ СВАРКОЙ

Параметры позиционирования определены оптическим телевизионным методом контроля с использованием поперечного зондирования оптического волокна широким пучком равномерной освещенности. Предложена геометрическая модель и получены математические выражения для определения параметров позиционирования: поперечного, продольного смещений и угла взаимного наклона осей волокон. Положение осей оптических волокон определено с использованием принципа согласованной фильтрации по координатам максимального значения автосвертки измеренной интенсивности. Параметры позиционирования определены из условий аппроксимации осей волокон линейным трендом.

**оптическое волокно, соединители, сварка, контроль, позиционирование, автосвертка**

### 1. Общая характеристика проблемы

В настоящий период в авиационно-космической технике отмечается широкое использование оптоэлектроники и волоконной оптики для построения датчиков, систем связи и обработки информации. Внедрение фотоники направлено на значительное улучшение командования, управления, связи, интеллектуальных возможностей (C<sup>3</sup>I - command, control, communication @ intelligence) и навигации за счет более быстродействующих, меньших по габаритам и массе, более надежных и более “выживаемых” систем. Использование оптоэлектронных и волоконно-оптических устройств значительно расширяет возможности боевой авиационной техники в области автоматического распознавания цели, мониторинга боеспособности систем и управления наведением [1]. При этом обеспечиваются большие объемы передаваемой информации и скорости обработки сигналов (до 1...10 Гб/с), управление и “жизнестойкость” систем управления ведением стрельбы, электромагнитная и радиоэлектронная защищенность (EMI/RFI), снижение массы. Волоконно-оптические датчики используются для систем противопожарного контроля в двигателях (Fiber-Optic Engine Fire Detection), волоконно-оптических тахометров, систем контроля за количеством

топлива и др.

Сложившиеся условия выдвигают как одну из главных проблем создание конструкций и технологий производства широкой гаммы отечественных комплектующих. Обеспеченность производства, монтажа и эксплуатации волоконно-оптических компонентов отечественной технологической базой является актуальной задачей.

### 2. Анализ исследований и публикаций, посвященных решению проблемы

Как известно, технология выполнения волоконно-оптических соединений методом сварки требует решения задач позиционирования ОВ, в ходе которого выявляется текущее взаиморасположение волокон [2]. К параметрам позиционирования соединяемых волокон, относятся:

– состояние торцов волокон, подлежащих соединению сваркой, которое, в свою очередь, характеризуется углом плоскости торца к оси сердцевины волокна (неперпендикулярностью) и высотой неровностей поверхности;

– угол наклона осей сердцевины соединяемых волокон друг к другу. В большинстве современных устройств позиционирования эта величина должна устраняться помещением волокон в V-образные канавки элементов позиционирующих устройств.

Однако, как показал опыт эксплуатации и исследований, данное свойство реализуется не всегда, поэтому при разработке автоматизированных методов контроля позиционирования необходимо предусматривать функцию анализа указанной величины;

– значения продольного и поперечного смещений сердцевины оптических волокон.

Знание первых двух параметров позволяет оператору качественно подготовить волокна к операции сварки. На основе последних двух параметров вырабатываются управляющие сигналы для исполнительных устройств, реализующих минимально необходимое количество степеней свободы в позиционировании оптических волокон (как правило, равное трем).

Указанные параметры позиционирования рационально определять с помощью оптического телевизионного метода контроля с использованием поперечного зондирования оптического волокна широким пучком равномерного по освещенности светового потока [3]. Схема реализации данного метода приведена на рис. 1. Здесь используется такое свойство, когда при поперечном освещении волокно представляет собой фокусирующую цилиндрическую линзу, которая создает в плоскости фотоприемника распределение оптического поля, позволяющее определить оптико-геометрические характеристики волокна [3].

### 3. Постановка задачи исследований

Основной сложностью при реализации указанного метода является анализ измеренной информации и формирование заключения о состоянии объектов сварки. Собственно методики обработки являются неразглашаемым достоянием того или иного производителя.

Целью исследований является решение задач, связанных с разработкой таких методик, их исследование и создание на их основе программ определения характеристик позиционирования.

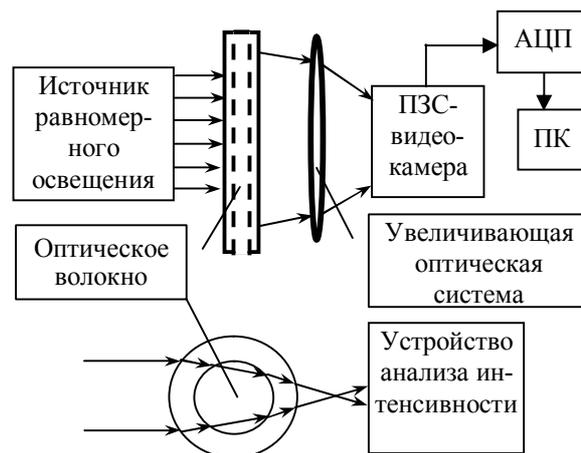


Рис. 1. Схема системы контроля позиционирования волокон при сварке

### 4. Обоснование метода идентификации расположения оптических волокон

При измерении светового потока, преобразованного оптическими волокнами, формируется изображение области концов волокон, подлежащих сварке, пример которого представлен на рис. 2.

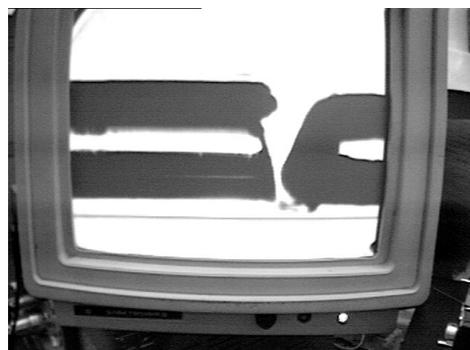


Рис. 2. Изображение оптических волокон на видеомониторе установки сварки

Характерными особенностями полученного изображения являются следующие:

– наибольшие по интенсивности оптического излучения области соответствуют свободному пространству, окружающему оптические волокна, и информационному сигналу, являющемуся результатом фокусирующего действия сердцевины. По уровню эти сигналы одинаковы и значительно превышают уровень темных областей;

– темные области соответствуют областям обо-

лочки оптического волокна;

– при смещении оптических волокон зоны, занимаемые областями фона выше и ниже волокна (применительно к рисунку), изменяют свои размеры;

– некачественная подготовка торцов волокон отражается на изображении видом границы перехода «оболочка – фон» (при наличии продольного смещения). В этой области изображения проявляются неперпендикулярность торца к оси сердцевины, неровности торцевой поверхности, а также дефекты торца в плоскости, перпендикулярной наблюдаемой. Так, на рис. 2 изображения сердцевин не доходят до конца торцов волокон. Это вызвано некачественным сколом в смежной плоскости (перпендикулярно плоскости листа данного документа);

– геометрические ошибки позиционирования проявляются в виде смещений волокон друг относительно друга, наклоне изображений, созданных сердцевинами, наличию яркой области между волокнами;

– несмотря на значительный уровень яркости, созданный сердцевинами, имеется влияние неоднородности интенсивности, вызванной погрешностями измерительной системы и состоянием волокна (например, некачественным удалением силиконового слоя с поверхности оболочки при подготовке волокон). Эти ошибки наиболее существенны на границе светлых и темных областей, поэтому при малых величинах контролируемых параметров могут приводить к значительным погрешностям идентификации.

Исходная информация, подлежащая анализу, представляет собой матрицу кодов яркостей, соответствующих точкам изображения. Разрешающая способность обусловлена размером и количеством элементов матрицы, а также увеличением оптической системы.

Проанализированные особенности выдвигают ряд требований к построению алгоритма определе-

ния параметров позиционирования. На начальном этапе анализа необходимо выделить границы характерных областей. Используем для этого методику пороговой селекции границ оболочки и сердцевины. Данный подход предполагает задаться неким значением, разделяющим сигнал на два уровня. В данной работе предлагается определять значение порога по схеме, приведенной на рис. 3 и поясняемой рис. 4. Если упорядочить измеренный массив яркостей по возрастанию, получаем подобие гистограммы распределения яркостей. При этом для характерной формы сигнала имеем явно выраженный перепад значений. Причем изменение уровня характеризуется значительной крутизной.

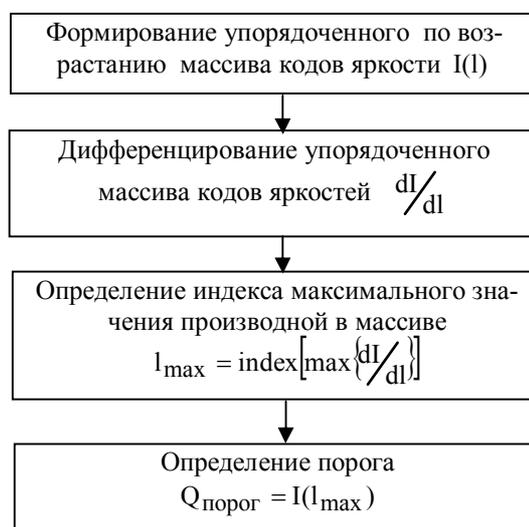


Рис. 3. Схема определения порогового значения

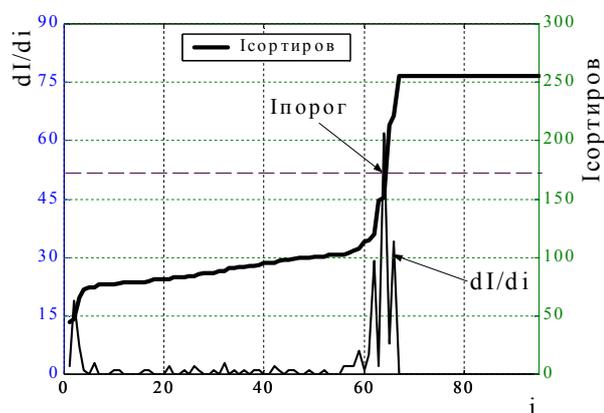


Рис. 4. Графики функции упорядоченных по возрастанию кодов яркости изображения и ее первой производной

Для точного определения значений сигнала, соответствующих точке скачка (порога), продифференцируем упорядоченный массив  $dI/dl$ . Тогда порог определяется путем выявления максимума производной и соответствующего ему значения упорядоченного массива по соотношению

$$Q_{\text{порог}} = I(l_{\text{max}}) = I\left\{\text{index}\left[\max\left(\frac{dI}{dl}\right)\right]\right\}, \quad (1)$$

где  $\max$  определяет операцию нахождения максимального элемента массива производных;  $\text{index}$  – процедуру нахождения индекса максимального значения производной.

Следующим этапом обработки является определение границ перехода яркости «свет – тень». Данная операция организуется программным способом в результате последовательного анализа каждого из поперечных сечений оптических волокон при перемещении прямоугольного окна размерностью  $[i \times 1]$  вдоль координаты  $j$  ( $i$  – номер строки, а  $j$  – номер сечения (столбца) матрицы яркостей). Так формируется матрица границ  $G$  размерностью  $[i \times j]$ :

$$G = [g_{i,j}], \quad (2)$$

в которой элементы, соответствующие границам областей, имеют значение «1», а остальные – значение «0». Размерность матрицы ( $i \times j$ ) определяется разрешением измерительной системы.

Очевидно, что результатом анализа каждого столбца будет наличие в каждом сечении четырех критических точек:

$$g_{\text{об,лев}}, g_{\text{сер,лев}}, g_{\text{сер,прав}}, g_{\text{об,прав}}.$$

При обнаружении «окном» отсутствия этих точек в столбце матрицы в соответствии с критерием

$$S(j) = \sum_i^{i_{\text{max}}} g_{i,j} \neq 4, \quad (3)$$

что может свидетельствовать либо о нахождении «окном» конца волокна, либо о том, что сердцевина не доходит до конца волокна (хотя бы одно из значений  $g_{\text{об,лев}}, g_{\text{сер,лев}}, g_{\text{сер,прав}}, g_{\text{об,прав}}$  равно ну-

лю) и необходимо произвести скол волокна, «окно» автоматически позиционируется на шаг (столбец) назад и считает эту позицию окончанием волокна.

На рис. 5 приведено графическое представление результатов работы алгоритма определения матрицы  $G$  для исходного сигнала (рис. 2).

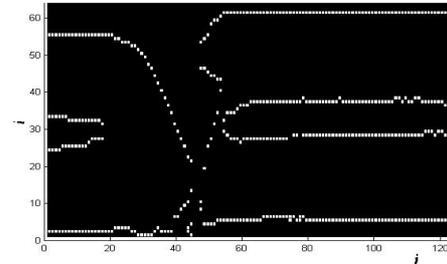


Рис. 5. Пример графического отображения значений матрицы для исходного сигнала

Задача определения координат осей сердцевин, учитывая форму распределения интенсивности, может быть решена несколькими способами. Из формы распределения видно, что крутизна границ в пределах каждого сечения позволяет достаточно точно определить границы областей в пределах сечений. Однако от сечения к сечению влияние граничных эффектов проявляется в колебании границ (шумовые погрешности). Учитывая, что ошибка имеет место на каждой из двух границ области, точное определение координат осей пороговым способом нецелесообразно. Здесь применим метод автосвертки, рассмотренный в [3]. Метод построен на принципах оптимальной фильтрации гауссова шума и позволяет исключить влияние погрешности измерения. В [3] показано, что координаты максимума автосвертки интенсивности располагаются на расстоянии удвоенных координат исходного положения осей. Автосвертка рассчитывается для каждого сечения (столбца) матрицы интенсивности независимо.

Результат использования автосвертки зависит от формы сигнала. Для сигналов с незначительной асимметричностью метод позволяет эффективно определять погрешности позиционирования. Однако для сигналов, в форме которых асимметрия сопро-

вождается большим уровнем интенсивностей поля, приходящихся на области асимметрии, приводит к тому, что максимум автовертки смещается в область большей пространственной плотности интенсивности. К таким сигналам относятся распределения интенсивности полей, полученные при значительных поперечных сдвигах волокон.

Данная особенность поясняется на рис. 6 и 7.

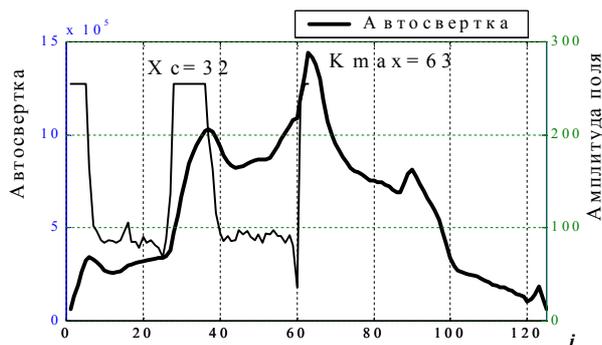


Рис. 6. Распределение амплитуды поля сигнала в сечении и его автовертка при незначительной асимметрии исходного сигнала (в [3] показано, что  $X_c \approx K_{max}/2$  [элементов матрицы])

Так, при значительных смещениях, когда уровень фона с какой-либо стороны занимает большую долю в сигнале, происходит пространственный сдвиг максимума автовертки в сторону, противоположную смещению волокон, и возникают неприемлемые существенные ошибки (рис. 7). В то же время незначительное различие фоновых составляющих позволяет надежно определять положение максимума (рис. 6).

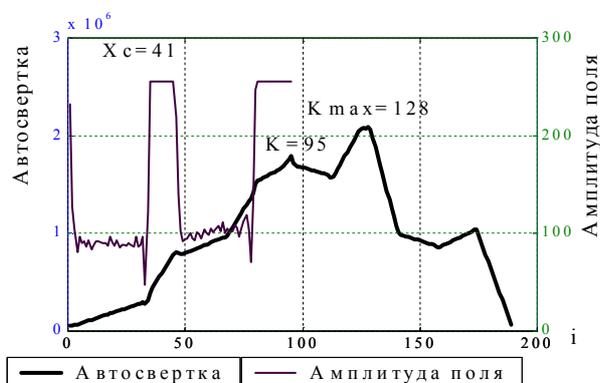


Рис. 7. Распределение амплитуды поля сигнала в сечении и его автовертка при значительном смещении оптического волокна влево

Использование в данном случае метода моментов (определение координат "центра тяжести" функции распределения интенсивности) приводит к намного худшим результатам. Таким образом, метод автовертки должен использоваться при окончательном, точном определении малых поперечных смещений волокон, что собственно является наиболее важной задачей при сварке.

На рис. 8 представлен результат применения метода автовертки к матрице, соответствующей изображению на рис. 2. Точки центральной области соответствуют зазору между волокнами, поэтому из дальнейшего анализа исключаются.

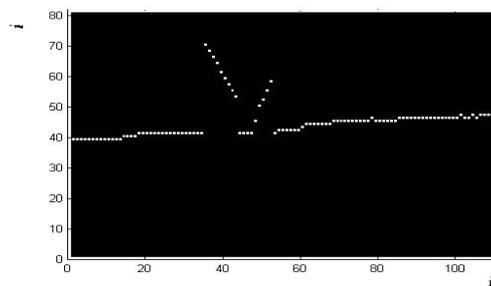


Рис. 8. Трасса сердцевин волокон, восстановленная методом автовертки

Результатом применения данного метода являются два массива – матрица центров осей  $X_c$  (матрица, в которой элементы, соответствующие оси сердцевин, равны «1», остальные – «0») размерностью  $[i \times j]$ , совпадающей с размерностью исходной матрицы кодов интенсивности изображения, например:

$$X = [x_{c_{i,j}}] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

и вектор размерностью количества столбцов (сечений)  $C[j]$ , элементы которого имеют значения, равные номерам строк  $i$ , в которых наблюдаются максимумы автовертки:

$$C = [m(i, j)] = [5 \ 5 \ 5 \ 0 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4]. \quad (5)$$

Вектор  $C$  используется для определения параметров позиционирования: угла между осями волокон, продольного и поперечного смещений. Геометрическая модель решения данной задачи представлена на рис. 9.

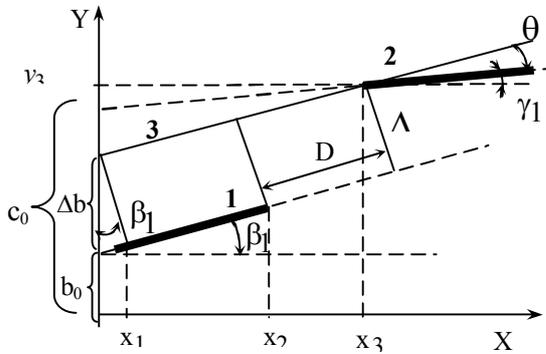


Рис. 9. Геометрическая модель для определения смещений между оптическими волокнами: 1 – линия оси первого волокна; 2 – линия оси второго волокна; 3 – прямая, параллельная оси первого волокна и проходящая через точку с координатами  $(y_3, x_3)$  на оси второго волокна;  $\Delta$  – поперечное смещение между волокнами;  $\theta$  – угловой наклон осей волокон относительно друг друга;  $D$  – продольное смещение волокон

Для определения характеристик позиционирования оптических волокон предлагается использовать метод аппроксимации координат осей линейным трендом. В этом случае оси каждого из волокон характеризуются уравнениями

$$y' = b_0 + b_1x, \tag{6}$$

$$y'' = c_0 + c_1x. \tag{7}$$

где коэффициенты регрессии  $b_0, b_1, c_0, c_1$  определяются по вектору  $C$  известным образом.

Учитывая свойства линейных уравнений, можем записать выражение для угла взаимного наклона осей сердцевин

$$\theta = \arctg(b_1) - \arctg(c_1) = \arctg \frac{b_1 + c_1}{1 - b_1c_1}. \tag{8}$$

Величина поперечного смещения может быть получена следующим образом

$$\Delta = \Delta b \cos \beta_1 = [y_3(x_3) - b_1x - b_0] \cos(\arctg(b_1)). \tag{9}$$

Следует отметить, что выражение (9) получено при условии, что оси волокон также не параллельны

оси  $X$ . Данное условие практически всегда имеет место, т.к. обеспечить параллельность осей волокон координатной сетке измерительной системы достаточно сложно.

Продольное смещение между волокнами определяется из соотношения

$$D = \frac{(x_3 - x_2)}{\cos \beta_1} + \Delta \sin \beta_1. \tag{10}$$

### 5. Результаты экспериментальных исследований

На рис. 10 представлены результаты экспериментальных исследований применения предложенного метода к измеренному изображению без смещения, а на рис. 11 – результаты аналогичных исследований в случае смещенных сердцевин.

Из анализа уравнений регрессии для рис. 10 и 11 можно сделать вывод, что наклон между осями сердцевин волокон незначительный, т.к. коэффициенты при переменной практически равны ( $0.0637 \approx 0.0665$  и  $0.3112 \approx 0.3142$ ), что соответствует углу  $0.0028$  рад для рис.10 и  $0.0029$  рад для рис.11. При пересчете в градусы угол взаимного наклона осей волокон составил около  $0.16^\circ$ . По техническим условиям угол не должен превышать  $1^\circ$ . Таким образом, все волокна установлены в V-образные фиксаторы позиционеров сварочной машины качественно, без взаимного наклона. Имеется лишь непараллельность фиксаторов координатной сетке измерительной системы.

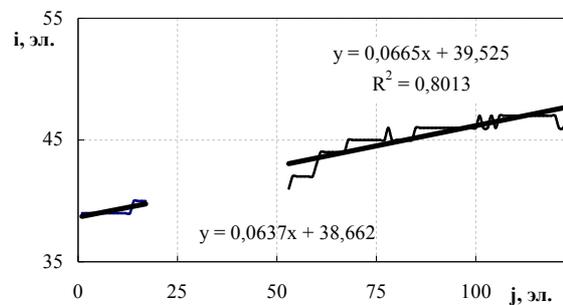


Рис. 10. Результаты экспериментальной обработки трасс осей сердцевин при практически полном отсутствии поперечного смещения

Результаты расчетов линейных смещений осей сердцевин представлены в табл. 1.

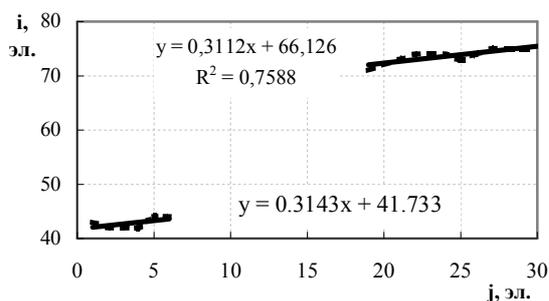


Рис. 11. Результаты экспериментальной обработки трасс осей сердцевин при существенных поперечном и продольном смещениях

Таблица 1  
Результаты определения продольных и поперечных смещений волокон

Изображение	$\Delta$ , эл.	D, эл.
Рис. 10	0.962	36.04
Рис. 11	23.18	20.58

Если анализировать данные для рис. 10, то видно, что из-за незначительного угла наклона к координатной сетке продольное смещение между волокнами D слабо отличается от того, который можно было определить из разницы  $x_3 - x_2 = 53 - 16 = 36$  эл. Во втором случае большое поперечное смещение и большой угол наклона к координатной сетке требуют использования точных формул (9) и (10), предложенных в данной работе ( $x_3 - x_2 = 19 - 6 = 13$  эл.  $< 20.58$  эл.). Однако для поперечного смещения ошибка менее значительна –  $65 - 42 = 23$  эл.  $\approx 23.18$  эл.).

Таким образом, предложенный метод определения параметров позиционирования обладает большей точностью и не чувствителен к неизбежным угловым наклонам оптических волокон к координатной сетке измерительной системы.

## Заключение

В результате исследований получены следующие научные результаты:

– предложен алгоритм выделения границ сердце-

вин и оболочек волокон на основе порогового метода, в котором оригинальным является методика определения порогового значения;

– предложена модель и получены выражения для определения параметров позиционирования: угла взаимного наклона волокон, поперечного и продольного смещения их осей, основанные на восстановлении осей волокон прямой линией по методу наименьших квадратов.

Практическое значение результатов состоит в разработке алгоритма и программного обеспечения (одно из окон представлено на рис. 12), реализующего предлагаемый метод контроля.

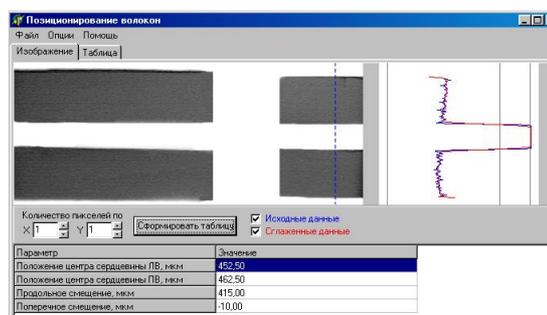


Рис. 12. Окно модуля определения параметров позиционирования

## Литература

1. L. Figueroa, C.S. Hong, R.W. Huggins, G.E. Miller, A.A. Popoff, Ch.R. Porter, D.K. Smith, B.V. Deventer. Fiber optics for military aircraft flights systems // IEEE LCS, February 1991. – P. 52 – 63.
2. Красюк Б. А., Корнеев Г. И. Оптические системы связи и световодные датчики. Вопросы технологии. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.
3. Филипенко А.И. Использование автосвертки распределения оптического поля для идентификации положения сердцевин оптических волокон при их соединении // Радиотехника. – 2003. – Вып. 132. – С. 109 – 114.

Поступила в редакцию 20.04.04

**Рецензент:** д-р. техн. наук, проф. В.Е. Овчаренко, Национальное аэрокосмическое агентство, ГП НИТИП, г. Харьков