

УДК 681.7.068.4

А.И. ФИЛИПЕНКО, И.Ш. НЕВЛЮДОВ*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина***КОНТРОЛЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ИХ СОЕДИНЕНИЯ**

С использованием принципа согласованной фильтрации получены соотношения, связывающие координаты центра распределения интенсивности оптического поля, сформированного объектом контроля, с координатами максимального значения автосвертки интенсивности. Приведены результаты экспериментальных исследований метода, подтверждающие его высокую точность, помехозащищенность и пригодность к контролю позиционирования оптических волокон с различными оптико-геометрическими свойствами.

оптическое волокно, соединители, контроль, позиционирование, фильтрация, автосвертка**1. Общая характеристика проблемы**

Для надежной передачи оптической мощности в коммутационных волоконно-оптических элементах определяющим является обеспечение прецизионного позиционирования оптических волокон и деталей коммутационных компонентов. Как известно, превышение величины допустимых смещений оптических волокон приводит к значительному росту вносимых оптических потерь. Современный уровень потерь в оптических волокнах составляет менее 0,5дБ/км, что предъявляет высокие требования к коммутационным компонентам. Одним из основных факторов, определяющих низкий уровень вносимых потерь при соединениях волокон, является устранение поперечного смещения соединяемых волокон. Эта задача решается обеспечением прецизионного позиционирования волокон в наконечниках разъемных соединителей или юстировкой волокон при выполнении их неразъемного соединения методом сварки. В обоих случаях встает задача автоматизированного определения пространственного расположения объектов позиционирования относительно базовых координат. В качестве последних могут выступать координаты осей оптических наконечников, осей сердцевин смежных оптических волокон или базовой оси технологического оборудования. Решение данной задачи достигается разработкой

специальных автоматизированных методов, которые должны обеспечивать погрешности позиционирования, не превышающие единиц процентов контролируемых величин и составляющие десятые доли микрометра. Большинство данных методов строится на основе восприятия и анализа оптических изображений позиционируемых компонентов [1 – 5].

2. Анализ исследований и публикаций, посвященных решению проблемы

В зависимости от решаемой задачи оптические методы определения координат могут строиться по схеме зондирования оптического волокна продольным или поперечным (к оси волокна) пучком [1]. Продольное зондирование обычно используется при армировании оптических волокон наконечниками разъемных соединителей, а поперечное – при выполнении операций сварки и других операций позиционирования неармированных волокон. В обоих вариантах анализируется результат взаимодействия равномерного светового потока с оптическим волокном. При этом типовая установка содержит источник освещения с равномерным распределением интенсивности, оптическую систему с высокой апертурой, многоэлементный фотоприемник, чаще всего на основе фотоприборов с зарядовой связью (ФПЗС), и обрабатывающий вычислительный блок (персональный компьютер) [2 – 4]. Отличие состоит

в том, что в первом случае анализируется модовое поле излучения сердцевинны оптического волокна, а во втором – оптическое поле, являющееся результатом фокусирующего действия поперечно освещенного оптического волокна. Общим является то, что характер распределения поля зависит от профиля показателя преломления.

Учитывая особенности коммутационных волоконно-оптических компонентов, основными из которых являются малые геометрические размеры, сложность и трансформацию модового состава распространяющихся оптических полей, наличие источников шума, возникают определенные проблемы в распознавании изображений и формировании заключения о пространственном расположении оптических волокон. Традиционные методы обработки, включающие в себя последовательные операции фильтрации изображений, решения обратных задач и определения центров картин распределения оптических полей, не всегда удовлетворяют противоречивым требованиям к производительности и точности. Большинство методов решения данной задачи основаны на стандартных методиках БПФ – фильтрация – БПФ или аппроксимации амплитуды поля по методу наименьших квадратов каким-либо многочленом или сплайн-функциями. При этом такие подходы позволяют только лишь восстановить распределение исходного оптического поля, устранив влияние особенностей линейного преобразования измерительной системы (неоднозначность соответствия между входом и выходом из-за ограниченной полосы амплитудно-частотной характеристики системы и наличия погрешностей (шума) измерения). Технология использования данных подходов в качестве следующего этапа обработки предполагает необходимость определения по восстановленным распределениям координат сердцевины оптических волокон. Из-за сложности оптического распределения (в котором невозможно полностью устранить указанное выше влияние) не удастся сформулировать

универсальную методику решения данной задачи для всех существующих типов оптических волокон и для всех имеющихся областей приложения. Наиболее распространенными являются два подхода: пороговый – когда границы оптических волокон определяются по геометрическим координатам точек функции распределения оптической интенсивности, соответствующим превышению эмпирически установленного для данного класса волокон порогового уровня; интегральный – когда геометрические координаты центра сердцевины рассчитываются через центральный момент первого порядка функции распределения интенсивности в виде [5]

$$X_C = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\left(\int_{x_1}^{x_2} x E^2(x) dx \right)}{\left(\int_{x_1}^{x_2} E^2(x) dx \right)}, \quad (1)$$

где $E^2(x)$ – интенсивность измеренного оптического поля, $E(x)$ – амплитуда электрического поля.

Основной недостаток первого метода состоит в том, что не учитывается реальное распределение оптического сигнала, с одной стороны, и с другой – представляет определенную трудность выбор пороговых уровней. Недостатками использования второго способа являются влияние формы распределения оптической интенсивности и значительный объем математических вычислений. Преодоление указанных проблем требует поиска и создания новых подходов в обработке методов и моделировании алгоритмов обработки экспериментальных данных.

3. Постановка задачи исследований

Целью исследований является разработка метода автоматизированного прецизионного контроля позиционирования оптических волокон при изготовлении коммутационных волоконно-оптических компонентов. Отличительным свойством предлагаемого подхода к решению задачи является повышение точности и надежности ее решения за счет использования методов оптимальной фильтрации изображений, сформированных оптическими волокнами, а

также повышение быстродействия и, следовательно, производительности технологического оборудования за счет снижения числа математических операций обработки. В ходе исследований решались задачи математического обоснования положений методики, имитационного моделирования на персональном компьютере и экспериментальных исследований на действующем технологическом оборудовании.

4. Теоретическое обоснование метода идентификации положения оптических волокон

Особенностью строения оптических волокон является то, что при отсутствии неприемлемых дефектов создаваемое ими распределение интенсивности полей имеет симметричный характер относительно оси сердцевин. Эта же особенность характерна и для волокон с сохранением поляризации, когда рассматривается изменение поля вдоль какой-либо из осей поляризации – медленной или быстрой. На рис. 1, а и 2, а приведены изображения оптических полей, полученные при продольном и поперечном зондировании оптических волокон, а на рис. 1, б и 2, б – соответствующие им распределения интенсивности полей в одномерном варианте по ортогональным осям.

Из рисунков видно, что сигнал является симметричным (хотя и имеет незначительные искажения, вызванные наличием дефектов и загрязнений на поверхностях волокон или оптических элементов) и представляет собой четную функцию относительно оси, проходящей через центр симметрии и совпадающей с искомой оптической осью сердцевин при отсутствии смещения. Поэтому задача контроля величины поперечного (радиального) смещения сводится к определению бокового сдвига центра симметрии сигнала. Решение этой задачи предлагается осуществлять с использованием принципа согласованной фильтрации в форме автосвертки [5].

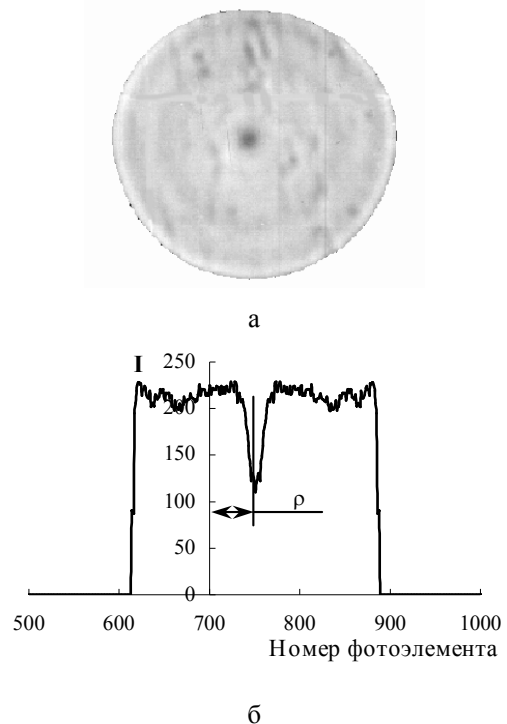


Рис. 1. Изображение оптического поля, полученное при продольном зондировании многомодового оптического волокна со ступенчатым ППП (а) и соответствующее ему распределение интенсивности поля в одномерном варианте (б)

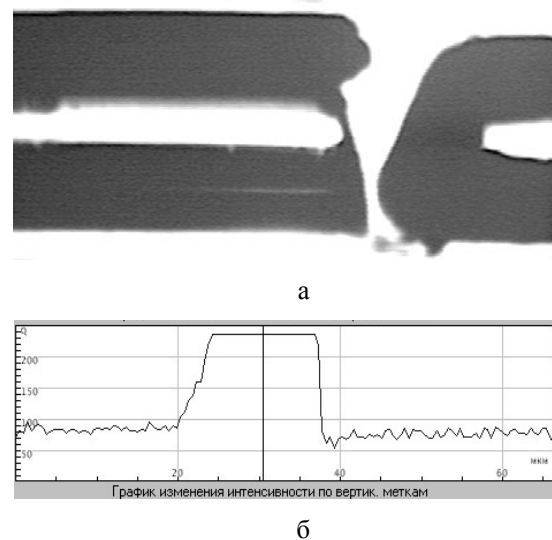


Рис. 2. Изображение оптического поля, полученное при поперечном зондировании одномодовых оптических волокон (а) и соответствующее ему распределение интенсивности поля поперечно оси сердцевин (б)

При точном позиционировании объекта центр картины распределения поля совмещен с базовым центром измерительной системы (например, центральным элементом приемника излучения). При

децентровке эта картина имеет боковое смещение (рис. 1,б).

Модель сигнала в сечении распределения интенсивности оптического поля можно представить в виде

$$\xi(x, \rho) = I(x, \rho) + n(x), \quad (2)$$

где $I(x) \approx E^2(x)$ – функция распределения интенсивности; $n(x)$ – аддитивный шум с нулевым средним значением; ρ – величина поперечного смещения.

Согласованный фильтр является оптимальным фильтром, минимизирующим среднеквадратическую погрешность при выделении полезной составляющей $I(x)$ из смеси с шумом $\xi(x)$. Импульсный отклик согласованного фильтра представляет собой перевернутую относительно y и сдвинутую на x_t функцию и имеет вид $h(x) = I(x_t - x)$ [5]. Согласованная фильтрация состоит в пропускании сигнала $I(x)$ через фильтр с импульсным откликом $h(x)$. Известно, что линейная фильтрация в пространственной области эквивалентна математической операции свертки

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t - \tau)d\tau. \quad (3)$$

В работе [5] на основе приведенных положений получено выражение, определяющее операцию автосвертки, которая зависит от параметра смещения ρ :

$$\begin{aligned} s(z) &= \int_{-D/2}^{D/2} \xi(x - \rho)\xi(x + \rho - z)dx \approx \\ &\approx \int_{-D/2}^{D/2} I(x)I(x + 2\rho - z)dx + \sigma_n^2. \end{aligned} \quad (4)$$

При $\rho = 0$ в (4) произвольному сигналу $I(x)$ соответствует интеграл автосвертки

$$s(z) \approx \int_{-D/2}^{D/2} I(x)I(z - x)dx. \quad (5)$$

При $z = 2\rho$ в (4) достигается максимальное значение автосвертки

$$s(2\rho) = \int_{-D/2}^{D/2} I^2(x)dx = \max\{s(z)\}, \quad (6)$$

которое совпадает со значением отклика согласованного фильтра. Следовательно, идентификация положения центра симметрии распределения интенсивности оптического поля сводится к регистрации распределения оптического поля, выполнению автосвертки этого сигнала и нахождению половинных координат положения максимума результирующей функции.

5. Моделирующие исследования метода контроля позиционирования оптических волокон на основе автосвертки

Возможности метода контроля позиционирования были исследованы моделированием с помощью пакета MATLAB.

В ходе экспериментов исследовались следующие положения теории:

- определение автосвертки исходного распределения интенсивности электрического поля при заданной погрешности измерения и нахождение по ее максимальному значению координат смещенного центра оптического волокна;

- определение значений и погрешностей координат центра сердцевины (модового поля) X_c , выраженных через центр тяжести функции интенсивности, и оценка их соотношения с координатами, определенными путем вычисления автосвертки исходного поля.

Эффективность и потенциальные возможности метода проверялись моделированием с использованием генератора псевдослучайных чисел для имитации ошибок измерения ε . Задавалось исходное распределение интенсивности электрического поля $I(x)$ в виде реализации некоторого статистического ансамбля. Для удобства вычислений и анализа результатов амплитуда поля нормировалась к единице. В качестве исходных использовались распреде-

ления, соответствующие наиболее распространенному типу ОВ с гауссовым пучком, а также многослойному дисперсионно-модифицированному волокну. Ошибка измерения задавалась величиной 10% от значения амплитуды поля в каждой точке распределения. После формирования сигнала с 10%-й ошибкой рассчитывались координаты центра распределения поля X_c в соответствии с соотношением (1), определяющим центр тяжести функции $I(x)$. Далее над этим же сигналом выполнялась операция автосвертки, определялся индекс максимального элемента сформированного массива и с учетом параметров координатной сетки определялась величина смещения ρ .

Для проведения исследований были разработаны алгоритмы и тексты программ, реализующих испытуемый метод. Схема алгоритма приведена на рис. 3. В качестве входных параметров задавались количество точек измерения L (обеспечивающее заданный интервал дискретизации), смещение сердцевины оптического волокна (в элементах координатной сетки) вдоль оси, задаваемой элементами ФПЗС, величина аддитивного шума.

Чувствительность метода проверялась варьированием величины исходного смещения t_{sm} .

Исходное распределение излучения гауссова пучка определялось по соотношению

$$I(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_{sm}}{r_{sw}} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где r_{sw} – радиус сердцевины световода; t_{sm} – величина задаваемого смещения (эл.).

Распределение интенсивности поля в волокне W-типа представлялось в виде

$$I(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } r_{sw} < t - t_{sm} < -r_{sw}; \\ 0,6 & \text{при } \begin{cases} -r_{sw} < t - t_{sm} < -0,8r_{sw}; \\ 0,8r_{sw} < t - t_{sm} < r_{sw}; \end{cases} \\ 0,4 & \text{при } \begin{cases} -0,8r_{sw} < t - t_{sm} < -0,5r_{sw}; \\ 0,5r_{sw} < t - t_{sm} < 0,8r_{sw}; \end{cases} \\ 0,8 & \text{при } -0,5r_{sw} < t - t_{sm} < 0,5r_{sw}. \end{cases} \quad (8)$$

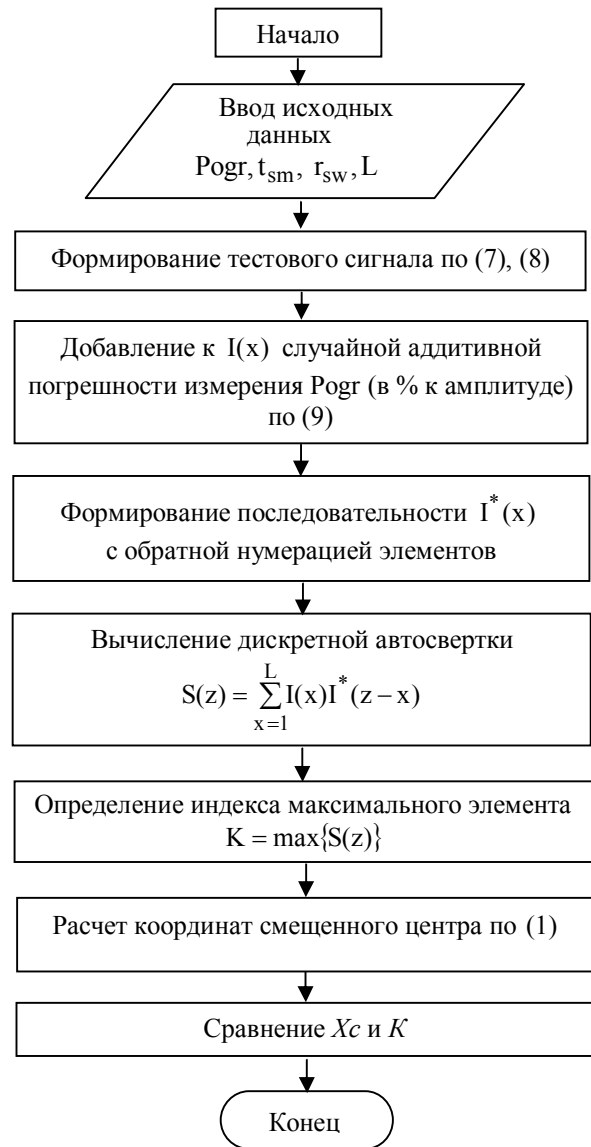


Рис. 3. Схема алгоритма моделирующих исследований

Влияние случайной погрешности измерения имитировалось в виде аддитивного шума

$$\tilde{I}(t) = I(t)(1 + \text{Rnmd} \cdot \text{Pogr}), \quad (9)$$

где Rnmd – равномерно распределенное случайное число в интервале $[-1, 1]$, вырабатываемое генератором случайных чисел; Pogr – величина относительной погрешности измерения.

На рис. 4 и 5 приведены распределения амплитуд исходных полей при наличии аддитивного 10%-го шума и вычисленные автосвертки. На рисунках k_{\max} – номер элемента изображения, соответствующего максимальному значению автосвертки. Количественные результаты исследований приведены в

табл. 1.

Из анализа проведенных исследований можно сделать вывод, что абсолютная погрешность контроля позиционирования оптических волокон методом автосвертки не превышает 0,1 мкм, что для типовых контролируемых значений смещений соответствует величине относительной погрешности менее 10%.

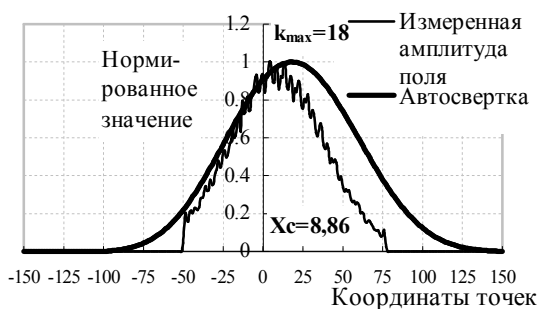


Рис. 4. Исходная амплитуда поля гауссова сигнала с 10%-м аддитивным шумом и его автосвертка

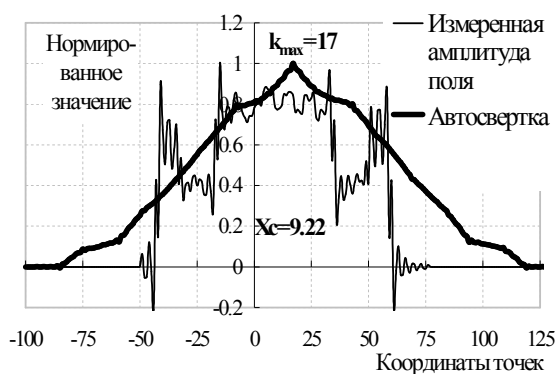


Рис. 5. Исходная амплитуда поля волокна W-типа с 10%-м аддитивным шумом и его автосвертка

6. Экспериментальные исследования технологии контроля позиционирования оптических волокон

Предлагаемый метод контроля позиционирования оптических волокон был экспериментально исследован на опытных образцах технологического оборудования. Исследования выполнялись с использованием измерительной установки, реализующей метод ближнего поля [2 – 5]. Чувствительность и точность метода при экспериментальных исследо-

ваниях проверялись с помощью эталонных смещений изображений на заданную величину ρ , контролируемую аттестованным измерителем малых перемещений.

Таблица 1
Результаты моделирующих исследований

Параметр	ОВ гауссова профиля	ОВ W-типа
Смещение исходного поля, мкм	0,89	0,92
Смещение автосвертки (в элементах изображения)	18	17
Смещение автосвертки, мкм	1,8	1,7
Рассчитанное через автосвертку смещение ОВ, мкм	0,9	0,85
Абсолютная погрешность, мкм	0,01	-0,07
Относительная погрешность, %	1,6	-7,8

Экспериментальная установка содержит микроскоп с устройствами закрепления и перемещения оптического волокна, индуктивный аттестованный измеритель малых перемещений «Микрон-02» с погрешностью контроля перемещений 0,02 мкм, источник излучения – полупроводниковый инфракрасный лазер, блок матричного ПЗС-фотоприемника, устройство аналого-цифрового преобразования, схему согласования и персональный компьютер (рис. 6).

Методика проведения исследований состояла в формировании сдвига излучения оптического волокна в плоскости многоэлементного ПЗС-фотоприемника, регистрации интенсивности оптического поля излучения, преобразовании его в цифровую форму и обработке по описанному выше алгоритму. Реальные смещения варьировались от 0 до 5 мкм (значения более 2 мкм вызывают недопустимое увеличение оптических потерь).

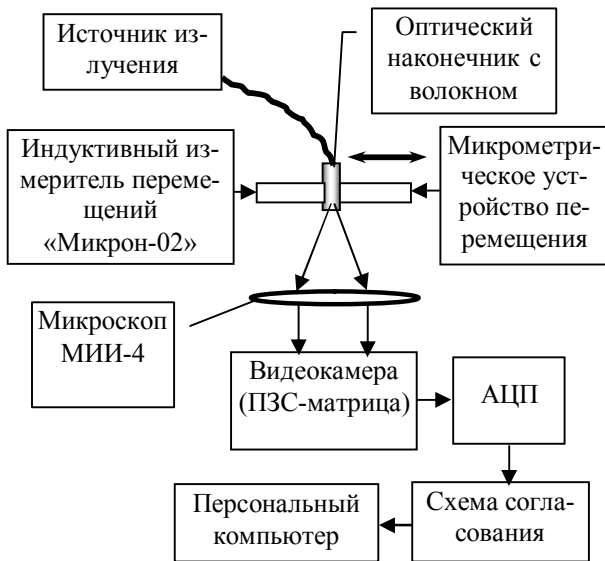


Рис. 6. Схема экспериментальной установки, реализующей метод ближнего поля

Пример исходного одномерного распределения излучения волокна со ступенчатым профилем (см. рис. 1) и его автосвертка представлены на рис. 7. Погрешность определения центра сердцевинки методом автосвертки не превышала шага между соседними элементами дискретизации изображения. Последний определяется координатной сеткой системы микроскоп – ПЗС – матрица и для используемой экспериментальной установки при увеличении микроскопа $300\times$ составляет 0,2 мкм.

Для исследования применения метода автосвертки в установках, реализующих поперечное зондирование оптического волокна, были проведены аналогичные экспериментальные исследования на автоматизированной установке сварки оптических волокон фирмы Fujikura. Вместо штатной системы технического зрения была использована фоторегистрирующая часть от рассмотренной выше экспериментальной установки (рис. 8). В качестве устройств перемещения использовались штатные микрометрические подвижки в режиме ручного управления. Перемещения V-образных фиксаторов оптических волокон контролировались индуктивным измерителем перемещений «Микрон-02». В качестве объекта

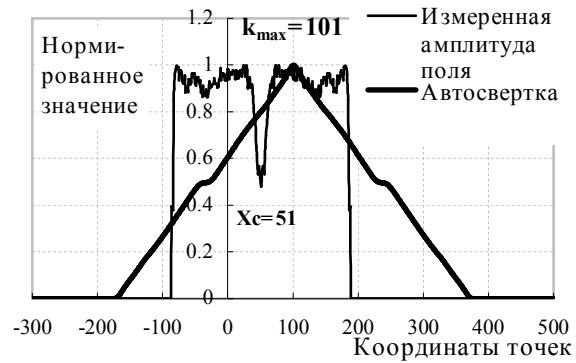


Рис. 7. Одномерное распределение интенсивности излучения ступенчатого оптического волокна (рис. 1, а) и его автосвертка

контроля использовалось одномодовое оптическое волокно диаметром 10/125 мкм со ступенчатым изменением показателя преломления.

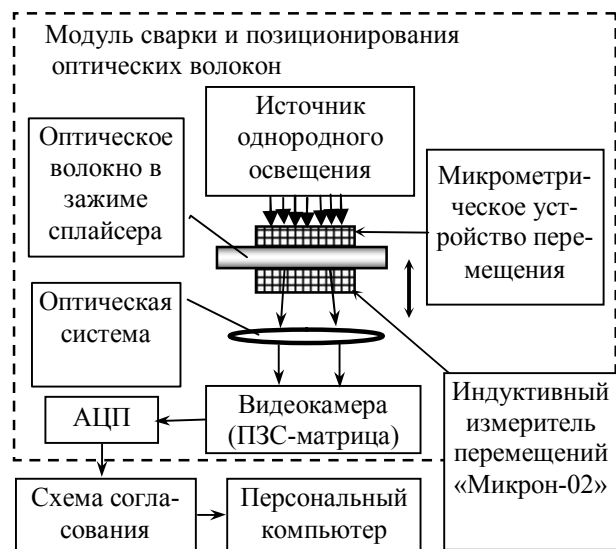


Рис. 8. Схема экспериментальной установки для исследования метода автосвертки при поперечном зондировании оптических волокон

На рис. 9 изображены исходное распределение оптического поля при освещении волокна поперечно оси, создаваемое одномодовым волокном (см. рис. 2), и его автосвертка.

Реальные сигналы могут быть сильно искажены влиянием помех. Исследования показывают, что результат вычисления автосвертки зависит от длины обрабатываемой реализации сигнала, уровня фона и шумов. Эта особенность заметна на рис. 9 и проявляется в росте значений автосвертки вне области

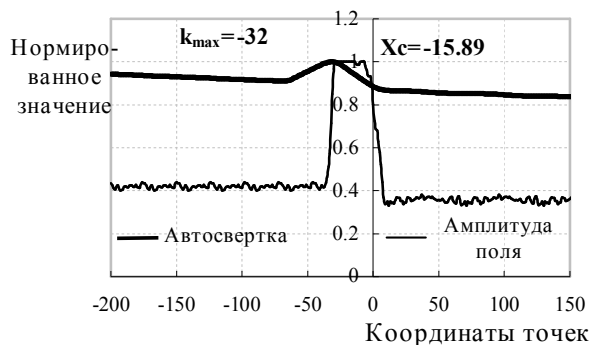


Рис. 9. Одномерное распределение оптической интенсивности при поперечном освещении одномодового оптического волокна (рис. 2, а) и его автосвертка при высоком уровне фона входного сигнала

информативной составляющей распределения поля. Однако даже при наличии значительных погрешностей измерения амплитуды поля имеется явно выраженный и однозначно определяемый максимум автосвертки, что позволяет с высокой точностью и помехозащищенностью определять погрешности позиционирования. В то же время использование для определения положения волокон соотношения (1) с учетом в пределах интегрирования неинформативной области сигнала приводит к грубейшим ошибкам, достигающим десятка элементов изображения.

Результаты исследований точности предлагаемого метода анализа и алгоритма сведены в табл. 2. Параметр «смещение исходного поля» представлен по результатам измерения эталонным прибором «Микрон-02». Из анализа таблицы видно, что погрешность для реальных полей, сформированных объектами контроля, во всех случаях не превышает двух элементов изображения, что соответствует величине менее 0,2 мкм.

Рассматриваемые как объект контроля оптические волокна имеют симметричное относительно оси сердцевины строение, однако ввиду действия различных факторов сформированные ими оптические поля могут характеризоваться существенной несимметричностью распределения. К данным фак-

торам относятся неравномерность источников освещения, дефекты формы и поверхностей, наличие загрязнений на объектах контроля и оптических элементах, неравномерность чувствительности и переноса заряда ПЗС-фотоприемников. Проведенные исследования показали, что, несмотря на перечисленные воздействия, предлагаемый метод обладает высокой помехозащищенностью и значительно более высокой точностью по сравнению с интегральным методом. Последний, очевидно, будет смещать координаты оси волокна в область значений с большей интенсивностью.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Параметр	ОВ ступенчатого профиля	Положение ОВ при сварке
Смещение исходного поля, мкм	5,10	-1,67
Смещение автосвертки (в элементах изображения)	101	-32
Смещение автосвертки, мкм	10,1	-3,2
Рассчитанное смещение ОВ, мкм	5,05	-1,6
Абсолютная погрешность, мкм	-0,05	0,07
Относительная погрешность, %	-1,0	-4,1

Были выполнены исследования предлагаемого метода для анализа позиционирования одномодовых волокон с сохранением поляризации типа «Панда» (рис. 10). На рисунке хорошо видно наличие существенных шумовых составляющих и влияние неоднородности освещения. Размерность исходной матрицы составляет [159;165] элементов.

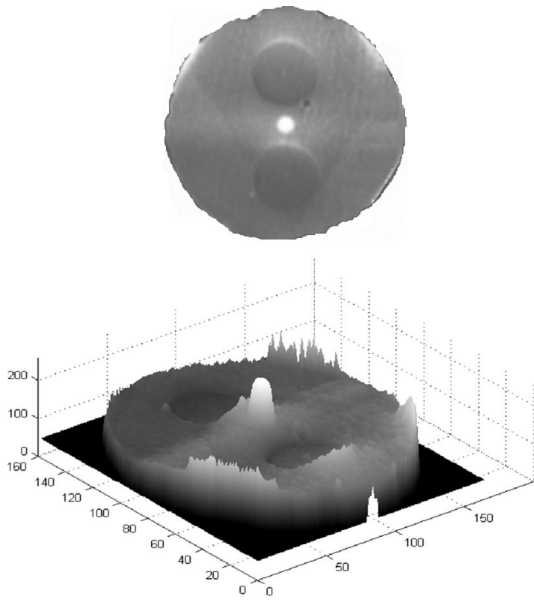


Рис. 10. Изображение торца одномодового волокна типа «Panda» и соответствующий ему график распределения интенсивности оптического поля

К данному изображению была применена операция двумерной дискретной свертки (рис. 11) и после анализа полученной матрицы были определены координаты ее наибольшего элемента: $K_{max}=[160;165]$ (необходимо учесть, что размерность массива автосвертки превышает размерность исходного массива в 2 раза). На рис. 11 хорошо видно фильтрующее действие операции автосвертки.

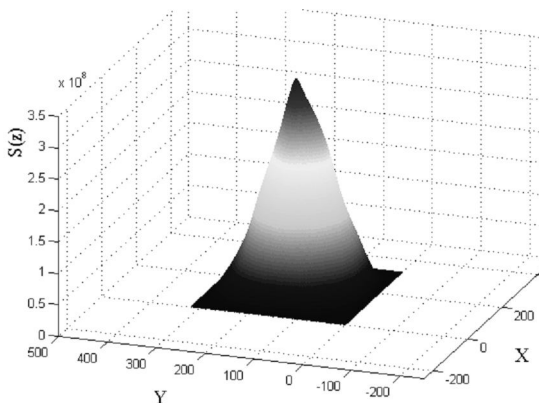


Рис. 11. Двумерная автосвертка распределения интенсивности излучения одномодового волокна

Для сравнения с другими методами определения координат в соответствии с (6) был выполнен расчет координат центра измеренного распределения интенсивности X_c . На рис. 12 изображен график рас-

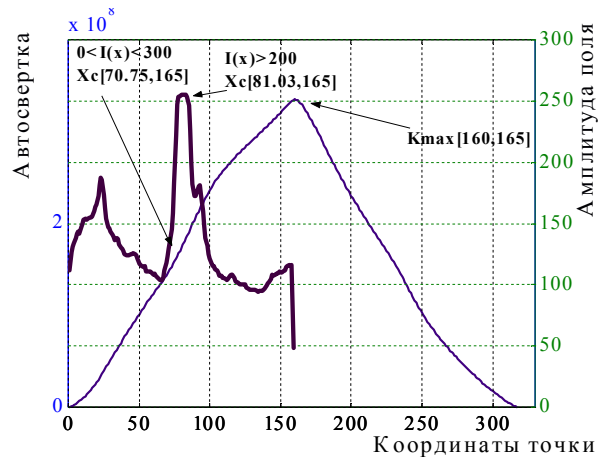


Рис. 12. Графики распределения интенсивности (жирная линия) и автосвертки (тонкая линия) для столбцов, проходящих через максимальный элемент автосвертки и центр сердцевины

пределения интенсивности для столбца, проходящего через центр сердцевины и максимум автосвертки. При учете всех элементов массива (интегральный метод) ее значение составило $X_{c1} = 70,75$ эл. При отбрасывании неинформативной области сигнала и учете распределения интенсивности только в области сердцевины (порогово-интегральный способ: применение (1) для элементов, удовлетворяющих условию, когда интенсивность поля $I(x) > 200$ координата имеет значение $X_{c2} = 81,03$ эл. Координата центра распределения, определенная по максимальному значению автосвертки, с учетом (4) составляет $\rho = K_{max}/2 = 80$ эл. Таким образом, разница между X_{c2} и ρ составляет один элемент дискретизации. Тогда как применение (1) ко всему распределению определяет координату центра $X_{c1} = 70,75$ эл, что дает ошибку 10,28 эл.

Несмотря на значительную асимметрию исходного распределения интенсивности, применение метода автосвертки обеспечило определение координат с высокой надежностью за счет присущего предложенному методу свойства высокой помехозащищенности.

Заключение

В результате исследований получены следующие научные результаты:

– на основе принципа согласованной фильтрации получены соотношения, связывающие координаты оси сердцевины оптического волокна с координатами максимального значения автосвертки дискретных значений интенсивности оптического поля, являющегося результатом взаимодействия зондирующего поля с оптическим волокном и которое регистрировалось установкой, реализующей метод ближнего поля (показано, что положение максимума автосвертки интенсивности соответствует удвоенному смещению оптического волокна);

– проведенные моделирующие и экспериментальные исследования на тестовом и реальном сигналах показали, что погрешность определения координат не превышает двух элементов дискретизации изображения или относительной погрешности менее 10% от допустимых смещений;

– результаты экспериментальных исследований подтвердили высокую помехозащищенность в условиях влияния фоновой, шумовой составляющих сигнала и возможной несимметричности сигнала, вызванных погрешностями измерительной установки и несовершенным состоянием объекта контроля.

Практическое значение результатов состоит в возможности построения на их основе эффективного алгоритма компьютерной обработки полей, создаваемых оптическими волокнами, для использования при контроле позиционирования волокон в разъемных и неразъемных соединениях независимо от типов используемых волокон. Использование для контроля позиционирования оптических волокон согласованного фильтра в виде автосвертки интенсивности оптического поля эффективнее традиционных методов фильтрации в частотной или пространственной области, так как требует меньшего количества математических операций, не выдвигает задачи определения импульсного отклика или час-

тотной характеристики фильтра, что в условиях значительной неоднородности возможных сигналов является достаточно сложной задачей. Как показали результаты исследований, значения достигнутых погрешностей идентификации позиционирования оптических волокон обеспечивают конструктивно-технологические требования к допустимым смещениям, сформированным на основе требований обеспечения уровня оптических потерь в соединении не более 0,5 дБ.

Литература

1. Лазарев Л.П., Мировицкая С.Д. Контроль геометрических и оптических параметров волокон. – М.: Радио и связь, 1988. – 280 с.
2. Филипенко А.И. Метод анализа интенсивности излучения и его использование в производстве волоконно-оптических компонентов // Радиотехника. – 1999. – Вып. 110. – С. 130 – 133.
3. Малик Б.А., Филипенко А.И. Система прецизионного контроля деталей компонентов волоконно-оптических систем передачи информации // Радиотехника. – 1997. – Вып. 103. – С. 31–34.
4. Невлюдов И.Ш., Филипенко А.И. Технологическое обеспечение оптико-геометрических параметров пассивных волоконно-оптических компонентов // Механіка та машинобудування. – 2000. – № 1. – С. 224 – 228.
5. Filipenko A., Nevludov I. Core position identification at the optical fibers connection by an autoconvolution method // Proceedings of 1-st International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers-CAOL'2003, Alushta, 16-20 September 2003. – 2003. – Vol. 2. – P. 124 – 128.

Поступила в редакцию 10.04.04

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