

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОСВЕРТКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ СЕРДЦЕВИН ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ИХ СОЕДИНЕНИИ

**Общая характеристика проблемы.** Реализация проектов информатизации Украины и ее интегрирования в мировую информационную систему обуславливает интенсивное и постоянно увеличивающееся использование волоконно-оптических систем. Построение таких систем требует обеспеченности широкой номенклатурой компонентов, основная масса из которых в настоящее время зарубежного производства. Сложившиеся условия выдвигают как одну из главных проблему создания конструкций и технологий производства широкой гаммы отечественных комплектующих для волоконно-оптических систем с параметрами не хуже иностранных изделий. Широкий класс используемых элементов представляют коммутационные волоконно-оптические компоненты: разъемные и неразъемные оптические соединители, оптические переключатели, ответвители, мультиплексоры, демультимплексоры и др. Для надежной передачи оптической мощности в данных элементах определяющим является обеспечение прецизионного позиционирования оптических волокон и деталей коммутационных компонентов. Как известно, превышение допустимых значений смещений оптических волокон приводит к значительному росту вносимых оптических потерь. Учитывая современный уровень потерь в оптических волокнах (менее 0,5 дБ/км), становятся понятными высокие требования к коммутационным компонентам. Одной из основных при обеспечении низкого уровня вносимых потерь является задача определения пространственного расположения объектов позиционирования относительно базовых координат. В качестве последних могут выступать координаты осей оптических наконечников, оси сердцевин смежных оптических волокон или базовая ось 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].

**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) лучом [1]. Продольное зондирование обычно используется при армировании оптических волокон наконечниками разъемных соединителей, а поперечное – при выполнении операций сварки и других операциях позиционирования неармированных волокон. В обоих вариантах стандартная схема построения типового устройства идентификации положения при позиционировании реализует метод ближнего поля и 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, 6]. Различие состоит в том, что в первом случае анализируется модовое поле излучения сердцевины оптического волокна, а во втором – оптическое поле, являющееся результатом фокусирующего действия поперечно освещенного оптического волокна. Однако и в том, и в другом случае характер распределения поля в значительной степени зависит от профиля показателя преломления.

Учитывая особенности коммутационных волоконно-оптических компонентов, основными из которых являются малые геометрические размеры, сложность и трансформация 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, вклю-

чающие последовательные операции фильтрации изображений, решения обратных задач и определения центров картин распределения оптических полей, не всегда удовлетворяют противоречивым требованиям производительности и точности. Преодоление указанных проблем требует поиска и создания новых подходов в обработке методов и моделировании алгоритмов обработки экспериментальных данных.

**Постановка задачи.** Целью исследований, которым посвящена данная статья, является разработка методики автоматизированного прецизионного контроля позиционирования оптических волокон при изготовлении коммутационных волоконно-оптических компонентов. Отличительным свойством предлагаемого подхода к решению задачи является повышение быстродействия (и, следовательно, производительности технологического оборудования) за счет снижения числа математических операций (использование автосвертки в отличие от стандартных методик БПФ-фильтрация-ОБПФ или аппроксимации амплитуды поля по методу наименьших квадратов) при сохранении высокой степени достоверности анализа оптических полей и определении координат объекта на фоне существующих шумовых составляющих. В ходе исследований решались задачи математического обоснования положений методики, имитационного моделирования на персональном компьютере и экспериментальных исследований на действующем технологическом оборудовании.

**Теоретическое обоснование методики.** Из особенностей строения оптических волокон известно, что при отсутствии неприемлемых дефектов создаваемое ими распределение интенсивности полей имеет симметричный характер относительно оси сердцевины. 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.

При точном позиционировании объекта центр картины распределения поля совмещен с базовым центром (например, центральным элементом приемника излучения). При децентровке эта картина имеет боковое смещение.

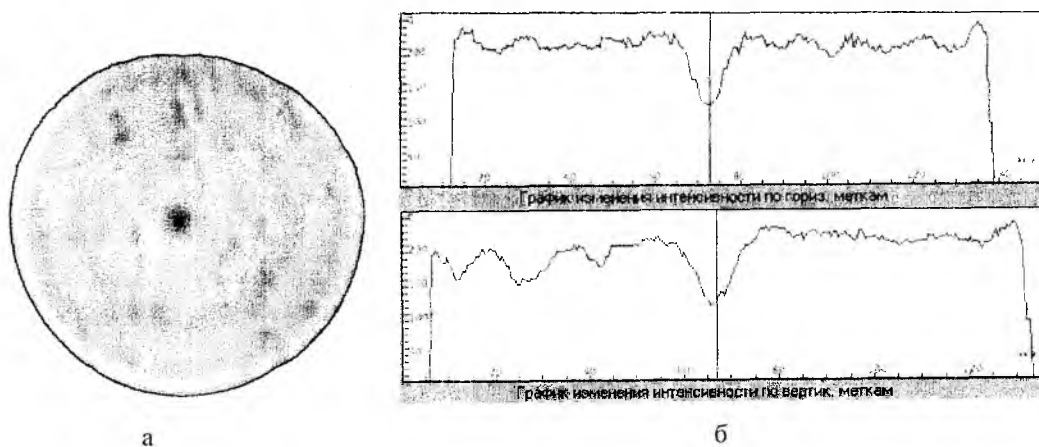


Рис. 1

Из рисунков видно, что сигнал является симметричным (хотя и имеет незначительные искажения, вызванные наличием дефектов и загрязнений поверхностей волокон или оптических элементов) и представляет собой четную функцию относительно оси, проходящей через центр симметрии и совпадающей с искомой оптической осью сердцевины при отсутствии смещения. Поэтому задача контроля величины поперечного (радиального) смещения сводится к определению бокового сдвига центра симметрии сигнала. Эту операцию в вычислительном блоке целесообразно выполнить на основе принципа согласованной фильтрации в форме автосвертки.

Модель сигнала в сечении распределения интенсивности оптического поля имеет вид

$$\xi(x, \rho) = I(x, \rho) + n(x), \quad (1)$$

где  $I(x)$  - функция распределения интенсивности,  $n(x)$  - аддитивный шум с нулевым средним значением,  $\rho$  - величина поперечного смещения.

Согласованный фильтр является оптимальным фильтром, минимизирующим среднеквадратическую погрешность при выделении полезной составляющей  $I(x)$  из смеси с шумом  $\xi(x)$ , причем импульсная характеристика согласованного фильтра с точностью до постоянного множителя должна представлять собой обращенную копию полезной составляющей, а именно

$$h(x) = \alpha I(-x). \quad (2)$$

Выходной сигнал согласованного фильтра определяется интегралом свертки

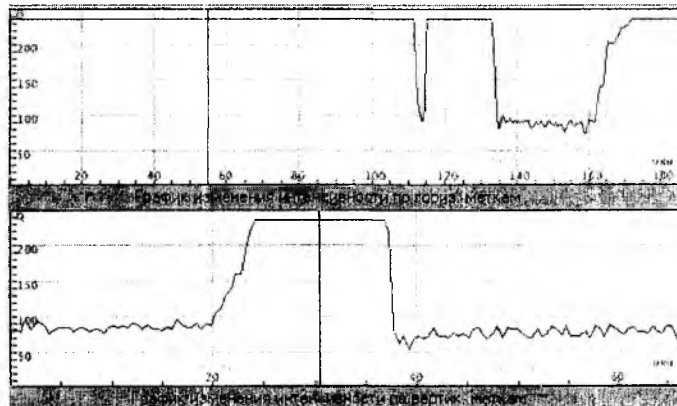


Рис. 2

$$s(z) = \xi(x) * h(x) = \int_{-D/2}^{D/2} \xi(x) h(z-x) dx, \quad (3)$$

где  $D$  - протяженность участка регистрации.

При подстановке (2) в (3) и  $\alpha = 1$  в точке  $z = 0$  имеем

$$s(0) = \int_{-D/2}^{D/2} I^2(x) dx + R_{ni}(0) \approx R_{ii}(0), \quad (4)$$

где оценка взаимной ковариационной функции шума и сигнала близка к нулю вследствие их статистической независимости. Таким образом, выходной сигнал согласованного фильтра соответствует автоковариационной функции полезной составляющей  $I(x)$  и достигает максимума в момент точной идентификации этой составляющей.

Использование согласованного фильтра в общем случае предполагает знание модели сигнала. Покажем, что решение задачи определения смещения центра симметрии сигнала  $\rho$  возможно без априорного знания значений параметров сигнала.

Обратимся к выражению (1) и, учитывая, что полезный сигнал является четной функцией, сдвинутой относительно начала координат в области независимой переменной на величину  $\rho$ , можем записать

$$I(x, \rho) = f(x - \rho), \quad (5)$$

где  $f(x) = f(-x)$ .

Это свойство позволяет использовать в (2) копию исходного распределения сигнала, перевернутого относительно вертикальной оси координат, а именно

$$h(x) = \xi(-x - \rho). \quad (6)$$

Подстановка (6) в (3) приводит к выражению

$$s(z) = \int_{-D/2}^{D/2} \xi(x-\rho)\xi(x+\rho-z)dx \approx \int_{-D/2}^{D/2} I(x)I(x+2\rho-z)dx + \sigma_n^2, \quad (7)$$

*определяющему операции автосвертки.*

Свойством автосвертки функции, которая удовлетворяет условию (5), является зависимость от параметра смещения  $\rho$ . При  $\rho=0$  в (7) произвольному сигналу  $I(x)$  соответствует интеграл автосвертки

$$s(z) \approx \int_{-D/2}^{D/2} I(x)I(z-x)dx. \quad (8)$$

В случае если соблюдается условие (5) и в (8)  $z = 2\rho$ , тогда достигается максимальное значение автосвертки

$$s(2\rho) = \int_{-D/2}^{D/2} I^2(x)dx = \max\{s(z)\}, \quad (9)$$

которое совпадает со значением отклика (4) согласованного фильтра. Следовательно, идентификация положения центра симметрии распределения интенсивности оптического поля сводится к выполнению автосвертки этого сигнала и нахождению положения максимума результирующей функции. Подчеркнем, что соотношения (7) – (9) получены без каких-либо априорных ограничений для исходного сигнала за исключением условия (5).

Проведенное рассмотрение позволяет построить алгоритм компьютерной обработки измеренного распределения оптического поля методом автосвертки. Этими операциями являются регистрация последовательности дискретных значений сигнала, формирование второй последовательности с обратной перенумерацией элементов, по-парное перемножение значений элементов этих последовательностей и суммирование полученных произведений при варьируемом параметре сдвига  $z$ . Максимальному результирующему значению полученной суммы соответствует такой сдвиг второй последовательности относительно первой, при котором наблюдается их совпадение по критерию минимума среднеквадратической погрешности.

**Результаты экспериментальных исследований.** Возможности алгоритма были исследованы моделированием на ЭВМ. Исследовались два вида распределения поля – гауссового типа (рис. 3) и так называемое W-типа, характерное для многослойных оптических волокон (рис. 4). На рис. 3 и 4 приведены распределения амплитуд исходных полей при наличии аддитивного 10%-го шума и вычисленные автосвертки. Шаг дискретизации изображения с учетом характеристик волокон, матрицы ФПЗС и увеличения оптической системы составляет 0,1 мкм. Координата центра исходного распределения поля рассчитывалась в соответствии с соотношением, определяющим центр тяжести функции распределения поля

$$X_c = \frac{\int_{-D/2}^{D/2} xI(x)dx}{\int_{-D/2}^{D/2} I(x)dx}. \quad (10)$$

На рисунках  $k_{\max}$  – номер элемента изображения, соответствующего максимальному значению автосвертки.

Аналогичные процедуры были проделаны для реальных оптических полей, полученных на измерительной установке, реализующей метод ближнего поля [5, 6]. Исходное распределение излучения волокна со ступенчатым профилем (рис. 1) и его автосвертка представлены на рис. 5. На рис. 6 изображены исходное распределение оптического поля поперечно оси

волокна, создаваемое одно-  
модовым волокном при попереч-  
ном зондировании (рис. 2), и  
его автосвертка.

Чувствительность и точ-  
ность метода при эксперимен-  
тальных исследованиях прове-  
рялась с помощью эталонных  
смещений изображений на за-  
данную величину  $\rho$ ,  
контролируемую аттестованным  
измерителем малых  
перемещений Микрон-02.  
варьировались от 0 до 5 мкм  
(значения более 2 мкм вызывают  
недопустимое увеличение опти-  
ческих потерь).

Исследования показывают,  
что результат вычисления авто-  
свертки зависит от длины обра-  
батываемой реализации сигнала,  
уровня фона и шумов. Эта осо-  
бенность заметна на рис.6 и про-  
является в росте значений авто-  
свертки вне области информа-  
тивной составляющей распреде-  
ления поля. Однако даже при  
наличии значительных погреш-  
ностей измерения амплитуды  
поля имеется явно выраженный  
максимум автосвертки, что по-  
зволяет с высокой точностью  
определять погрешности пози-  
ционирования. В то же время,  
использование для определения  
положения волокон соотноше-  
ния (10) с учетом в пределах ин-  
тегрирования неинформативной  
области сигнала приводит к гру-  
бейшим ошибкам, достигающим  
нескольких десятков элементов  
изображения.

Результаты исследований точности предлагаемых методики и алгоритма сведены в табл. 1. Параметр «Смещение исходного поля» для колонок 2 и 3 рассчитан по (10), а для колонок 4 и 5 представлен по результатам измерения эталонным прибором Микрон-02. Измеренные данные предварительно были подвержены фильтрации методом скользящего среднего, исключению фоновой и шумовой составляющих вне информативной области сигнала. Из анализа таблицы видно, что погрешность во всех случаях не превышает двух элементов изображения, что соответствует величине менее 0,2 мкм.

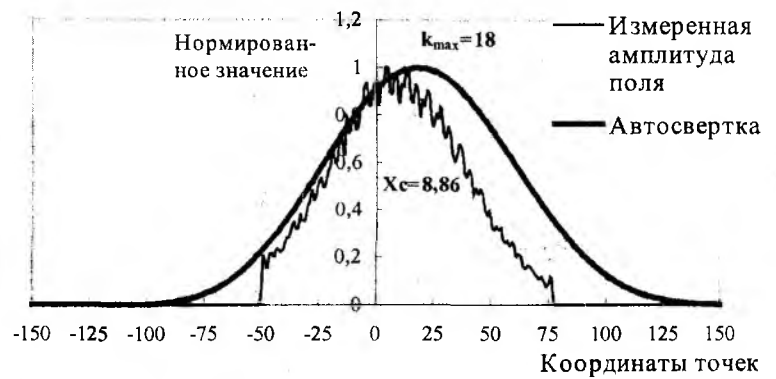


Рис. 3

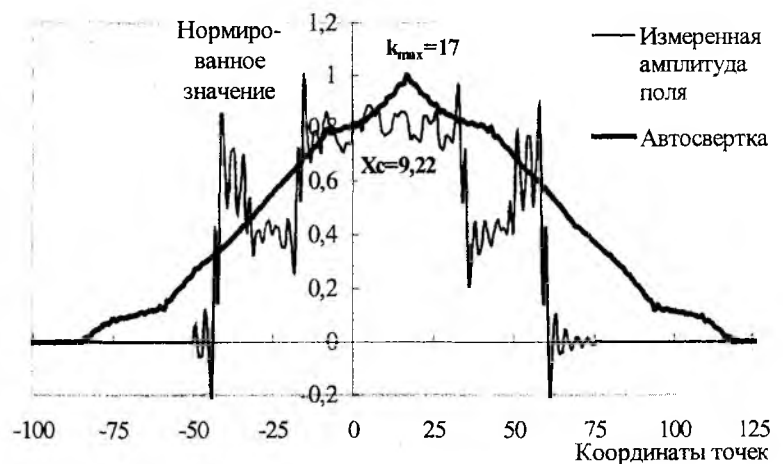


Рис. 4

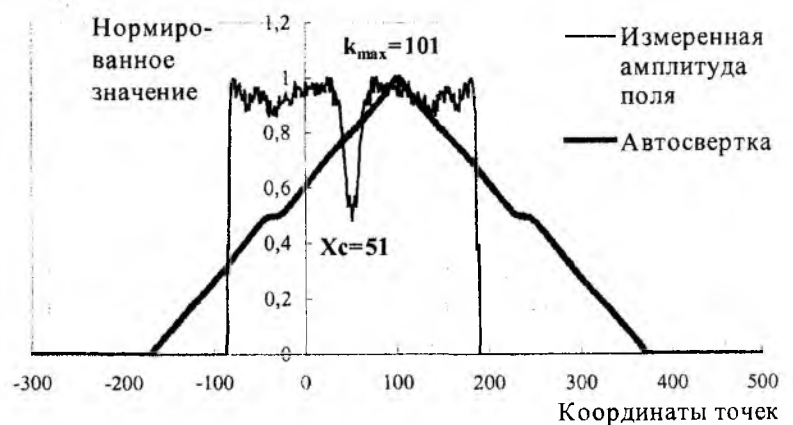


Рис. 5

Параметр	ОВ гаусового профиля	ОВ W-типа	ОВ ступенчатого профиля	Положение ОВ при сварке
Смещение исходного поля, мкм	0,89	0,92	5,10	-1,67
Смещение автосвертки (в элементах изображения)	18	17	101	-32
Смещение автосвертки, мкм	1,8	1,7	10,1	-3,2
Расчитанное смещение ОВ, мкм	0,9	0,85	5,05	-1,6
Абсолютная погрешность, мкм	0,01	-0,07	-0,05	0,07
Относительная погрешность, %	1,6	-7,8	-1,0	-4,1

**Выводы.** Использование для контроля позиционирования оптических волокон согласованного фильтра в виде автосвертки распределения оптического поля эффективнее традиционных методов фильтрации в частотной или пространственной области, так как требует меньшего количества математических операций, не выдвигает задачи определения импульсной характеристики фильтра, что представляет достаточно сложную задачу. В тоже время из условий согласованной фильтрации в данном случае обеспечиваются высокие параметры точности. Как показали результаты исследований, значения достигнутых погрешностей

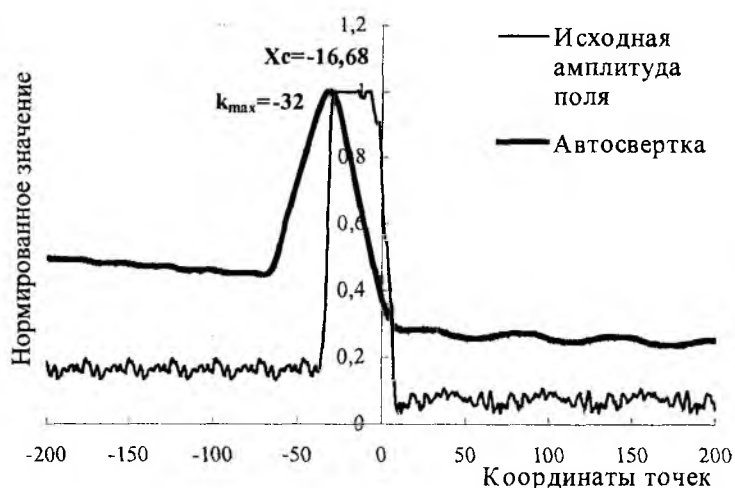


Рис. 6

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. Дальнейшие исследования в данной области могут выполняться по нескольким направлениям. Во-первых, следует расширить применение предложенной методики на задачи контроля деталей коммутационных компонентов (например, для контроля соосности отверстий и базовых поверхностей оптических наконечников, а также кварцевых капилляров). Во-вторых, рассмотренная задача является элементом целого комплекса задач, решение которых направлено на осуществление высококачественных волоконно-оптических соединений. Это предполагает необходимость интеграции методов идентификации радиальных, угловых и продольных смещений, а также методов определения формы торцов соединяемых волокон.

**Список литературы:** 1. Лазарев Л.П., Мировицкая С.Д. Контроль геометрических и оптических параметров волокон. М.: Радио и связь, 1988. 280с. 2. M.Artiglia, G.Coppa, P.Di Vita, M.Potenza, A.Sharma. Mode field diameter measurements in single-mode optical fibers // CSELT Technical reports-Vol.XVIII, №1, February, 1990, P. 43 – 55. 3. M.Artiglia, G.Coppa, P.Di Vita, M.Potenza. Accuracy of mode field diameter measurements in single-mode optical fibers from near-field technique//CSELT Technical reports-Vol.XVIII, №2, April, 1990, P. 119 – 120. 4. Беррикашвили В.Ш., Козлов М.Н., Колбин И.И. Видеодиагностика геометрических параметров одномодовых ОВ // Электросвязь. 1990. № 10. С. 22 – 23. 5. Филипенко А.И. Метод анализа интенсивности излучения и его использование в производстве волоконно-оптических компонентов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харьков: ХТУРЭ. 1999. Вып. 110. С. 130 – 133. 6. Малик Б.А. Филипенко А.И. Система прецизионного контроля деталей компонентов волоконно-оптических систем передачи информации // Там же. 1997. Вып. 103. С. 31 – 34.