

УДК 681.7.068.4

А.И. ФИЛИПЕНКО, О.В. СЫЧЕВА

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина***МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ
ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В ПРОЦЕССЕ СОЕДИНЕНИЯ**

В данной работе предложен метод автоматизированного контроля позиционирования ФКВ при выполнении соединений, основанный на принципе согласованной фильтрации в форме автосвертки. Получены соотношения связывающие координаты оси сердцевины ФКВ с координатами максимального значения автосвертки значений интенсивности оптического поля. Определены значения координат центра сердцевины ФКВ и их погрешности, выраженные через центр тяжести функции интенсивности излучения, и проведена оценка их соотношения с координатами, определенными разработанным методом. Исследования показали, что предлагаемый метод обладает высокой помехозащищенностью и значительно более высокой точностью по сравнению с интегральным методом.

автосвертка, контроль, позиционирование, фотонно-кристаллическое волокно**Введение**

Общая характеристика проблемы. В последнее время наряду с обычными кварцевыми оптическими волокнами в электронной технике все более широко используется новый тип волокон – фотонно-кристаллические (ФКВ) или микроструктурированные (МС) волокна. В отличие от стандартных волокон в оболочке ФКВ имеются воздушные каналы. В зависимости от геометрии, размеров каналов, интервала между ними, а также их взаимного расположения (в виде шестиугольника или случайное расположение каналов) можно в широких пределах изменять оптические свойства ФКВ. Например, ФКВ могут иметь одномодовый режим распространения в широком спектральном диапазоне, большую или, наоборот, малую площадь модового пятна для увеличения или уменьшения нелинейных эффектов, низкие или высокие потери на сгибах, высокую нелинейность для генерации гармоник и суперконтинуума, точно управляемую поляризацию, дисперсию групповой скорости, спектр пропускания и двулучепреломление.

Благодаря своим необычным свойствам возможные области применения фотонно-кристаллических волокон достаточно велики: WDM устройства и компенсаторы дисперсии; телекоммуникационные

системы; волоконно-оптические лазеры; оптические генераторы; сенсоры измерения температуры; возможность реализации многожильных волокон и др.

Во многих случаях, например при монтаже элементов функциональной электроники на основе ФКВ, возникает необходимость выполнения соединений ФКВ между собой либо со стандартными оптическими волокнами. Это неизбежно приводит к возникновению деформаций геометрии ФКВ и к различным смещениям. Как известно, превышение допустимых значений смещений приводит к значительному росту вносимых оптических потерь.

Постановка задачи исследований. Одной из основных при обеспечении низкого уровня вносимых потерь является задача определения пространственного расположения объектов позиционирования, в частности ФКВ, относительно базовых координат. В качестве последних могут выступать оси сердцевины смежных оптических волокон, оси оптических накопителей 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 десятки доли микрометра. Большинство существующих методов

строится на основе восприятия и анализа оптических изображений позиционируемых волокон и предназначены для контроля параметров стандартных оптических волокон [1 – 3].

Целью исследований, которым посвящена данная работа, является разработка метода автоматизированного прецизионного контроля позиционирования ФКВ при выполнении соединений. В ходе исследований решались задачи математического обоснования положений методики, имитационного моделирования на персональном компьютере и экспериментальных исследований на технологическом оборудовании.

Теоретические исследования метода контроля позиционирования ФКВ

Оптические методы определения расположения волокон могут строиться по схеме зондирования ФКВ продольным или поперечным к оси волокна лучом. Различие состоит в том, что в первом случае анализируется модовое поле излучения сердцевинки 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 строения ФКВ и компонентов на их основе, основными из которых являются малые геометрические размеры, сложный характер изменения профиля показателя преломления, трансформация модового состава распространяющихся оптических полей, наличие источников шума, возникают определенные проблемы в распознавании изображений и формировании заключения о пространственном расположении волокон.

Традиционные методы обработки, включающие последовательные операции фильтрации изображений, решения обратных задач и определения центров картин распределения оптических полей пред-

назначены для контроля стандартных оптических волокон. Большинство методов решения данной задачи основаны на стандартных методиках БПФ – фильтрация – ОБПФ 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, устраняя 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 сердцевинки волокон.

Учитывая сложность оптического распределения сложно сформулировать универсальную методику решения данной задачи для ФКВ. Наиболее распространенным является интегральный метод, при котором геометрические координаты положения рассчитывают через центральный момент первого порядка функции распределения интенсивности в виде

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

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

Основным недостатком использования данного метода является влияние формы распределения оптической интенсивности и значительный объем математических вычислений. Преодоление указанных проблем требует поиска и создания новых подходов в отработке методов и моделировании алгоритмов обработки экспериментальных данных.

Из особенностей строения оптических волокон известно, что при отсутствии неприемлемых дефектов создаваемое ими распределение интенсивности

полей имеет симметричный характер относительно оси сердцевин. Эта же особенность характерна и для ФКВ.

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.

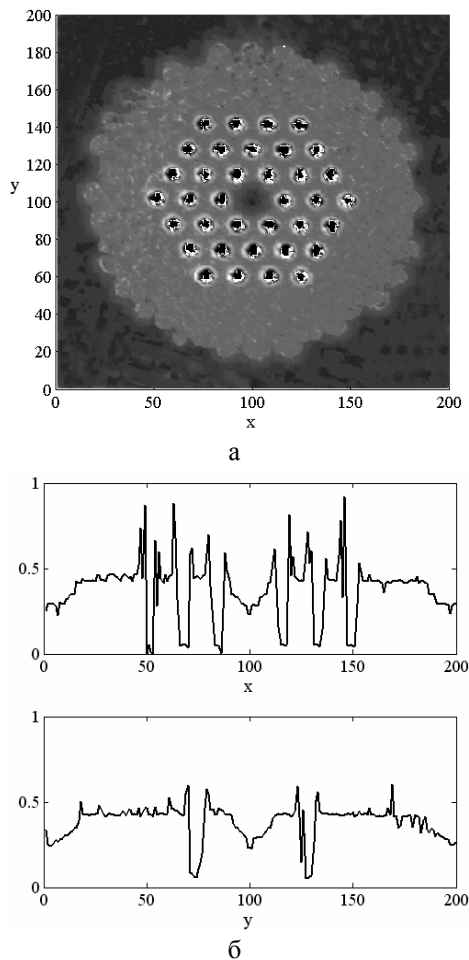


Рис. 1. Оптическое поле, полученное при продольном зондировании ФКВ (а) и соответствующие ему распределение интенсивности поля в одномерном варианте по ортогональным осям (б)

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 совпа-

дающей 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 [4 – 6].

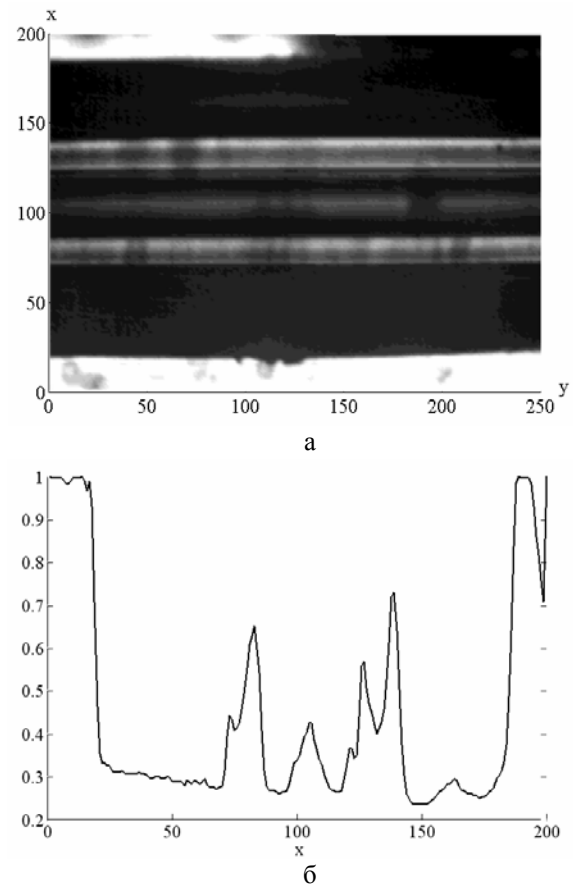


Рис. 2. Оптическое поле, полученное при поперечном зондировании ФКВ (а) и соответствующие ему распределение интенсивности поля в одномерном варианте в поперечном сечении (б)

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

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

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

Согласованный фильтр является оптимальным фильтром, минимизирующим среднеквадрати-

ческую 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

$$h(x) = I(x_t - x) . \quad (3)$$

Наличие сдвига означает, что для обнаружения сигнала длительностью x_t необходимо подать его в течение времени x_t после появления сигнала. Согласованная фильтрация состоит в пропуске сигнала $I(x)$ через фильтр с импульсным откликом $I(-x)$. Оптимальный фильтр не зависит от амплитуды сигнала, т.е. вместо $I(-x)$ можно взять $\alpha \cdot I(-x)$.

Таким образом, импульсная характеристика согласованного фильтра с точностью до постоянного множителя должна представлять собой обращенную копию полезной составляющей, а именно

$$h(x) = \alpha I(-x) . \quad (4)$$

Известно, что линейная фильтрация в пространственной области эквивалентна математической операции свертки

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t - \tau)d\tau . \quad (5)$$

Как отмечено, для согласованного фильтра $h(t) = x(-t)$, поэтому

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)x(\tau - t)d\tau . \quad (6)$$

Функция взаимной корреляции $x(t)$ и $x(-t)$ имеет вид

$$C(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t - \tau)dt . \quad (7)$$

Таким образом, согласованная фильтрация сводится к свертке $x(t)$ и $x(-t)$ или вычислению их автокорреляционной функции. Применяя данные сведения, запишем выходной сигнал согласованного

фильтра в виде интеграла свертки

$$s(z) = \xi(x) * h(x) = \int_{-D/2}^{D/2} \xi(x)h(z - x)dx , \quad (8)$$

где D – протяженность участка регистрации.

При подстановке (4) в (8) и $\alpha = 1$ в точке $z = 0$ имеем

$$s(0) = \int_{-D/2}^{D/2} I^2(x)dx + R_{ni}(0) \approx R_{ii}(0) , \quad (9)$$

где оценка взаимной ковариационной функции шума и сигнала R_{ni} 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.

Проведенное рассмотрение позволяет построить алгоритм компьютерной обработки измеренного распределения оптического поля методом авто-свертки. Этими операциями являются регистрация последовательности дискретных значений сигнала, формирование второй последовательности с обратной перенумерацией элементов, попарное 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.

Моделирующие и экспериментальные результаты исследований

Возможности метода контроля позиционирования были исследованы моделированием на ЭВМ. 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 ФКВ;

– определение значений и их погрешностей координат центра сердцевини 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 на ЭВМ с использованием генератора псевдослучайных чисел для имитации ошибок измерения ϵ . Задавалось исходное распределение интенсивности электрического поля $I(x)$ в виде реализации некоторого статистического ансамбля. Ошибка измерения задавалась величиной 10% от значения амплитуды поля в каждой точке распределения. После формирования сигнала с 10% ошибкой рассчитывались координаты центра распределения поля X_c в соответствии с соотношением, определяющим центр тяжести функции $I(x)$

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

Далее над этим же сигналом выполнялась операция автосвертки, определялся индекс максимального элемента сформированного массива. Для проведения исследований были разработаны алгоритмы и тексты программ, реализующие испытуемый метод. Схема алгоритма приведена на рис.3. Моделирование осуществлялось в среде MATLAB.

Предлагаемый метод контроля позиционирования ФКВ был экспериментально исследован на опытных образцах технологического оборудования.

Исследования выполнялись по методике, аналогичной моделированию на ЭВМ, с использованием измерительной установки, реализующей метод ближнего поля.

Чувствительность и точность метода при экспериментальных исследованиях проверялась с помощью эталонных смещений изображений на задан-

ную величину ρ , контролируемую аттестованным измерителем малых перемещений.

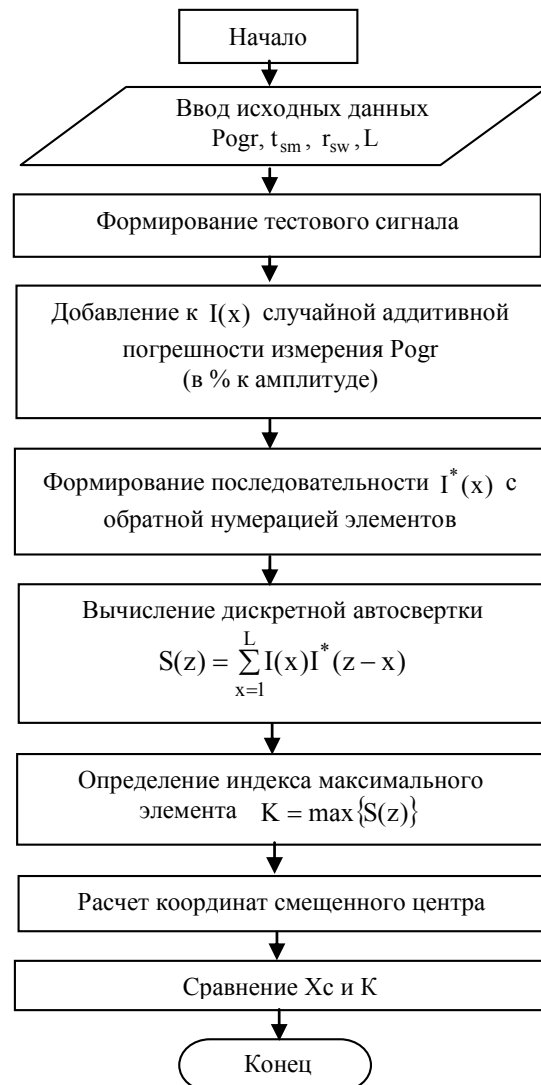


Рис. 3. Схема алгоритма моделирующих исследований

Для исследования применения метода автосвертки в установках, реализующих поперечное зондирование оптического волокна, были проведены экспериментальные исследования на автоматизированной установке сварки оптических волокон фирмы Fujikura (рис. 4). Вместо штатной системы технического зрения был использован блок матричного ПЗС – фотоприемника, устройство аналого-цифрового преобразования, схема согласования и персональный компьютер.

Экспериментальная установка также содержит в своем составе микроскоп с устройствами закрепле-

ния и перемещения волокна, источник излучения – полупроводниковый инфракрасный лазер. В качестве устройств перемещения использовались штатные микрометрические подвижки в режиме ручного управления. Перемещения V-образных фиксаторов оптических волокон контролировались индуктивным аттестованным измерителем перемещений «Микрон-02» с погрешностью контроля перемещений 0.02 мкм. В качестве объекта контроля использовалось фотонно-кристаллическое волокно с кварцевой сердцевиной.

Методика проведения исследований состояла в формировании сдвига изображения ФКВ в плоскости многоэлементного ПЗС-фотоприемника, регистрации интенсивности оптического поля излучения, преобразования его в цифровую форму и обработку по алгоритму, описанному выше. Реальные смещения варьировались от 0 до 5 мкм.

Погрешность определения центра сердцевины методом автосвертки не превышает одного элемента дискретизации изображения. Последний, как отмечалось, определяется координатной сеткой системы микроскоп – ПЗС-матрица (для используемой экспериментальной установки при увеличении микроскопа $300\times$ составляет 0.1 мкм).

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. На рис. 5 изображены исходное распределение оптического поля при освещении волокна поперечно оси, создаваемое ФКВ (рис. 2), и его автосвертка в двух различных сечениях. Необходимо отметить, что максимумы автосвертки распола-

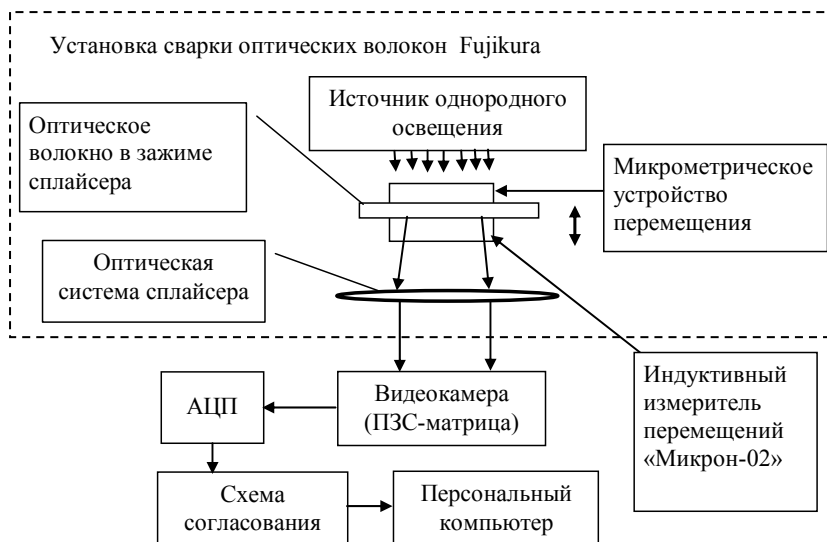


Рис. 4. Схема экспериментальной установки на базе устройства сварки оптических волокон фирмы Fujikura для исследования метода автосвертки при поперечном зондировании ФКВ

гаются на расстоянии удвоенных координат по сравнению с исходным положением осей.

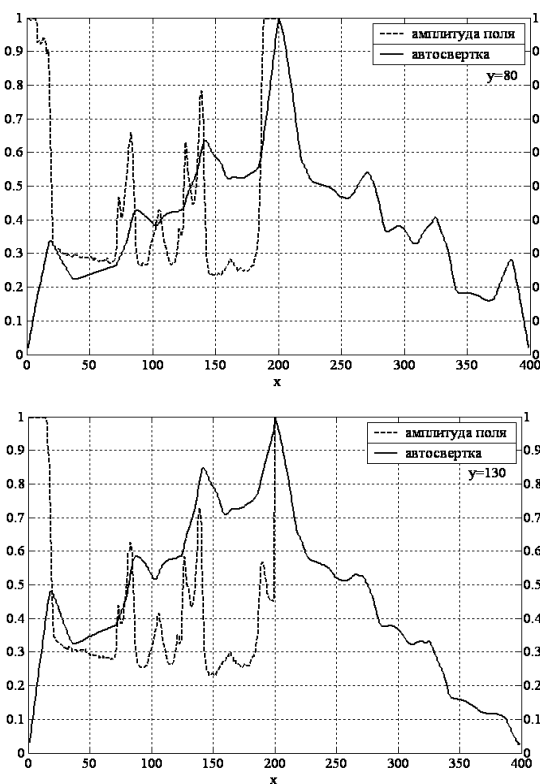


Рис. 5. Одномерные распределения оптической интенсивности при поперечном освещении ФКВ и его автосвертка ($X_c = 101$, $k_{\max} = 200$ в сечении $y = 130$; $X_c = 102$, $k_{\max} = 200$ в сечении $y = 80$)

Как уже отмечалось, ФКВ имеют относительно своей оси симметричное строение. Однако ввиду действия различных факторов, сформированные

ими оптические поля, могут характеризоваться существенной несимметричностью распределения. К данным факторам относятся неравномерность источников освещения, дефекты формы и поверхностей, наличие загрязнений на объектах контроля и оптических элементах, неравномерность чувствительности и переноса заряда ПЗС-фотоприемников.

Были проведены исследования, которые 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, что неизбежно приводит к грубейшим ошибкам, достигающим нескольких десятков элементов изображения. Результаты исследований точности предлагаемого метода анализа и алгоритма сведены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты исследований

Параметр	ФКВ	Положение ФКВ при сварке
Смещение исходного поля, мкм	12,6	10,25
Смещение автосвертки (в элементах изображения)	251	202
Смещение автосвертки, мкм	25,1	20,2
Расчитанное смещение ОВ, мкм	12,55	10,1
Абсолютная погрешность, мкм	-0,05	-0,15
Относительная погрешность, %	-0,4	-1,5

Параметр «Смещение исходного поля» представлен по результатам измерения эталонным прибором «Микрон-02». Из анализа таблицы видно, что погрешность для реальных полей, сформированных объектами контроля, не превышает двух элементов изображения, что соответствует величине менее 0.2 мкм. С учетом данной величины и точности позиционирования при проектировании измерительной системы должны выбираться количество элементов дискретизации в пределах длительности полезного сигнала и возможных диапазонов его смещений.

На рис. 6 приведены трехмерные графики распределения интенсивности изображения и его автосвертка.

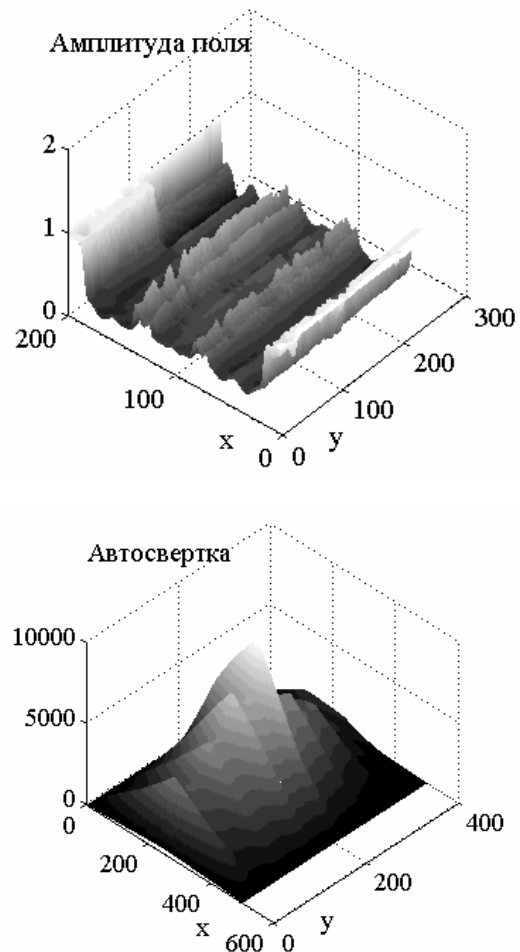


Рис. 6. Графики измеренного изображения и его автосвертка

Как видно из рисунка, определить максимумы, соответствующие осям волокон не представляет сложности.

Результатом применения данного метода являются два массива:

– матрица центра оси X_c (матрица, в которой элементы, соответствующие оси сердцевины, равны «1», остальные – «0») размерностью $[i \times j]$, совпадающей с размерностью исходной матрицей кодов интенсивности изображения,

$$\begin{cases} x_c(i, j) = 1 & \text{if } \delta \in conv(i, j) = \max; \\ x_c(i, j) = 0 & \text{if } \delta \in conv(i, j) \neq \max, \end{cases}$$

$$X = [x_{ci,j}] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

– вектор размерностью количества сечений $\tilde{N}[j]$, элементы которого имеют значения, равные номерам строк i , в которых наблюдаются максимумы автосвертки

$$C = [m(i, j)] = [5 \ 5 \ 5 \ 0 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4]. \quad (12)$$

На рис. 7 представлен результат применения метода автосвертки к измеренному изображению.

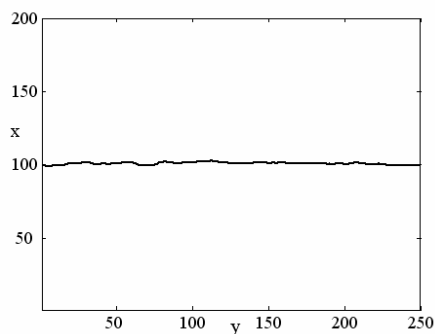


Рис. 7. Трасса сердцевини ФКВ, восстановленная методом автосвертки

Заключение

В данной работе разработан метод контроля позиционирования фотонно-кристаллических волокон, основанный на анализе измеренного распределения интенсивности оптического поля и вычислении автосвертки ее дискретных значений. Возможности метода были исследованы моделированием на ЭВМ. Показано, что даже при наличии значительных погрешностей измерения амплитуды поля имеется явно выраженный и однозначно определяемый максимум автосвертки. Поэтому данный метод обладает высокой помехозащищенностью и значительно более высокой точностью по сравнению, например, с интегральным методом, при котором координаты оси волокна сильно зависят от формы распределения амплитуды поля, что приводит к грубейшим

ошибкам, достигающим нескольких десятков элементов изображения.

Литература

1. Филипенко А.И. Метод анализа излучения оптических волокон // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХТУРЭ, 1997. – Вып. 103. – С.26-30.
2. Филипенко А.И., Малик Б.А. Система прецизионного контроля деталей компонентов волоконно-оптических систем передачи информации // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХТУРЭ, 1997. – Вып. 103. – С.31-34.
3. Филипенко А.И. Метод анализа интенсивности излучения и его использование в производстве волоконно-оптических компонентов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХТУРЭ, 1999. – Вып. 110. – С.130-133.
4. Филипенко А.И. Использование автосвертки распределения оптического поля для идентификации положения сердцевин оптических волокон при их соединении // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХНУРЭ, 2003. – Вып. 132. – С.109-114.
5. Филипенко А.И. Исследование применения согласованной фильтрации для идентификации положения сердцевин оптического волокна // Високи технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ “ХП”, 2004. – Вып. 2 (9). – С. 233-242.
6. Filipenko A., Nevludov I. Core position identification of the optical fibers connection by an autocorrelation method // Proc. of SPIE: Advanced optoelectronics and lasers. – 2004. – Vol. 5582. – P. 269-277.

Поступила в редакцию 11.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Овчаренко, ГП НИТИП НКА Украины, Харьков.