

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ИХ СОЕДИНЕНИИ

Филипенко А.И., Сычева О.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
(61166, Харьков, пр. Ленина, 14, каф. ТАПР, тел. (057) 702-14-86)

E-mail: fai@kture.kharkov.ua

The modeling and experimental researches results of the photonic crystal fibers positioning technique based on measured optical field intensity distribution analysis and its discrete autoconvolution calculation are represented. The absolute error of optical fibers positioning control calculated by autoconvolution method does not exceed 0.1 microns that for typical controllable values of shift corresponds to relative error less than 10 %.

Введение. Для надежной передачи оптического сигнала определяющим является обеспечение прецизионного позиционирования фотонно-кристаллических волокон (ФКВ) между собой или с другими элементами функциональной электроники. Как известно, превышение допустимых значений смещений соединяемых волоконно-оптических элементов приводит к значительному росту вносимых оптических потерь. 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 сердцевин смежных оптических волокон, оси оптических наконечников или базовая ось технологического оборудования.

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. 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 [1, 2]. При этом такие подходы позволяют только восстановить распределение исходного оптического поля, устраняя влияние особенностей линейного преобразования измерительной системы (неоднозначность соответствия между входом и выходом из-за ограниченной полосы АЧХ системы и наличия погрешностей (шума) измерения). Технология использования данных подходов в качестве следующего этапа обработки предполагает необходимость определения по восстановленным распределениям координат сердцевин волокон. Учитывая сложность оптического распределения сложно сформулировать универсальную методику решения данной задачи для ФКВ [3].

Целью исследований, которым посвящена данная работа, является разработка метода автоматизированного прецизионного контроля позиционирования ФКВ при выполнении соединений. Отличительной чертой предложенного подхода к решению задачи является повышение точности и надежности ее решения за счет использования методов оптимальной фильтрации сформированных ФКВ изображений, а также повышение быстродействия (а, значит, производительности технологического оборудования) за счет уменьшения 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.

Обоснование метода позиционирования. Из особенностей строения оптических волокон известно, что при отсутствии неприемлемых дефектов создаваемое ими распределение поля имеет симметричный характер относительно оси сердцевины (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 совпадает с искомой оптической осью сердцевины при отсутствии смещения. Поэтому задача контроля позиционирования сводится к определению бокового смещения центра симметрии сигнала. Решение этой задачи предлагается осуществлять с использованием принципа

согласованной фильтрации в форме автосвертки.

При точном позиционировании ФКВ центр картины распределения поля совмещен с базовым центром измерительной системы (например, центральным элементом приемника излучения). При децентровке эта картина имеет боковое смещение. Идентификация положения центра симметрии распределения интенсивности оптического поля сводится к выполнению автосвертки этого сигнала и определению положения максимума результирующей функции.

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

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

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

Согласованный фильтр является оптимальным фильтром, минимизирующим среднеквадратическую погрешность при выделении полезной составляющей $I(x)$ из смеси с шумом $\xi(x)$. Выходной сигнал согласованного фильтра можно представить в виде интеграла свертки

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

где D – протяженность участка регистрации.

Учитывая, что $h(x) = \alpha I(-x)$ и $\alpha = 1$ в точке $z = 0$ имеем

$$s(0) = \int_{-D/2}^{D/2} I^2(x)dx + R_{ni}(0) \approx R_{ii}(0), \quad (3)$$

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 автосвертки. 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.

Результаты исследований. Эффективность и возможности предложенного метода контроля позиционирования ФКВ проверялись компьютерным моделированием. В ходе исследования задавалось исходное распределение интенсивности оптического поля $I(x)$ в виде массива данных.

Влияние случайной погрешности измерения имитировалось в виде 10% гауссова шума с нулевым средним значением. На рис. 1 приведены смещенный на пятнадцать элементов исходный сигнал и этот же сигнал с добавлением ошибок измерения (пунктирная линия).

В ходе экспериментов наблюдалось значительное влияние фоновой составляющей оптического поля (участки, расположенные по сторонам волокна) на точность расчетов. Причиной этому является высокая интенсивность указанных участков, что приводит к грубым ошибкам при определении центра волокна. Решением данной проблемы является удаление фоновой составляющей. Для этого предлагается вычислить дифференциал оптического сигнала (см. рис. 2), что позволит выделить точки, в которых происходит резкое изменение интенсивности излучения. Первые минимальное значение интенсивности с левой стороны и максимальное с правой стороны и определяют границы оболочки волокна. Изменяя значения интенсивности оптического поля в точках меньших минимального значения и больших максимального на нули (рис. 3), исключаем влияние фоновой составляющей на дальнейшие расчеты.

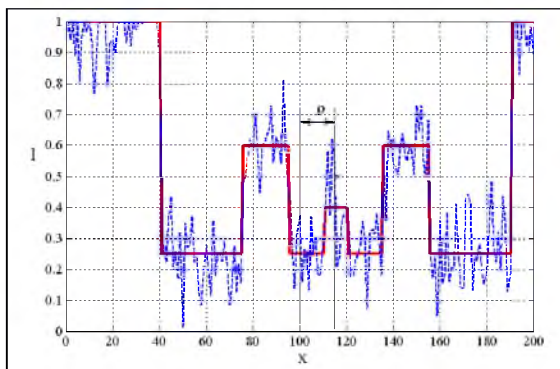


Рис. 1. Тестовый сигнал и сигнал с 10% погрешностью измерения смещенный на $\rho = 15$ элементов вправо

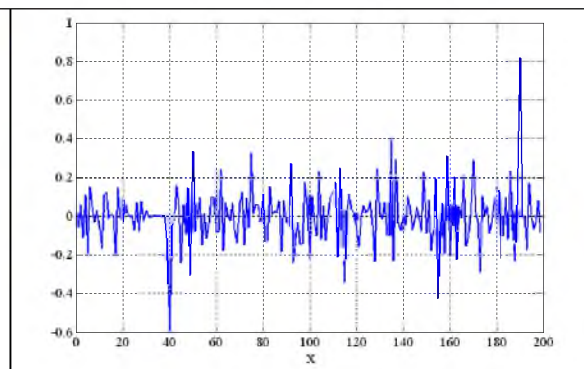


Рис. 2. Дифференциал тестового сигнала

После формирования сигнала с 10% ошибкой и удаления фоновой составляющей, проводилась операция автосвертки, определялся индекс максимального элемента сформированного массива X_{\max} и, с учетом параметров координатной сетки, определялось значение смещения ρ (рис. 4).

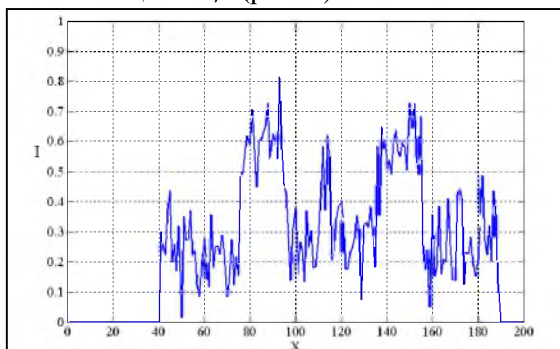


Рис. 3. Тестовый сигнал с исключенным фоном

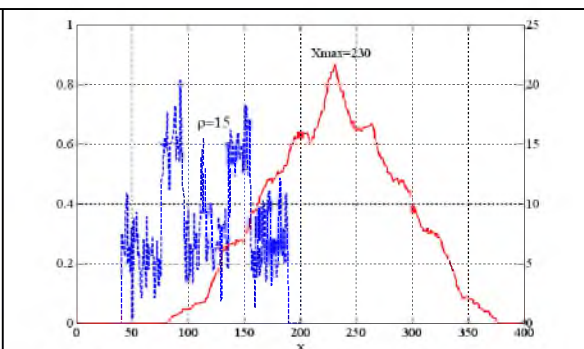


Рис. 4. Тестовый сигнал и его автосвертка

Предложенный метод контроля позиционирования ФКВ был экспериментально исследован на опытных образцах технологического оборудования. Исследования проводились по методике, аналогичной моделированию на компьютере. Чувствительность и точность метода при экспериментальных исследованиях проверялись с помощью эталонных смещений изображений на заданную величину ρ , контролируруемую аттестованным измерителем малых перемещений. Методика проведения исследований заключается в формировании смещения излучения ФКВ в плоскости многоэлементного ПЗС фотоприемника, регистрации интенсивности оптического поля излучения, преобразования его в цифровую форму и обработку. Реальные смещения варьировались от 0 до 5 мкм.

На рис. 5 (а, б) показаны исходные распределения оптического поля ФКВ при поперечном осциллировании при разных фокусах линзы. Шаг дискретизации изображения с учетом характеристик волокон, матрицы ФПЗС и увеличения оптической системы составляет 0.1 мкм.

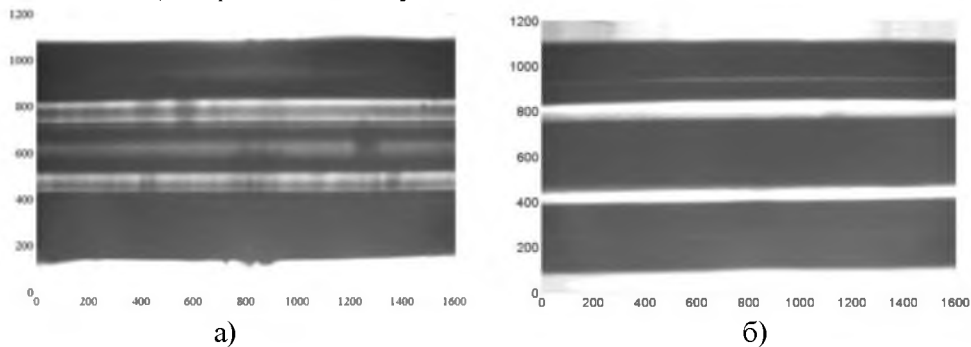


Рис. 5. Интенсивность оптического поля при поперечном освещении ФКВ

Результаты исследований точности предложенного метода анализа и алгоритма сведены в

табл. 1. Параметр “Смещение исходного поля” представлен по результатам измерения эталонным прибором “Микрон-02”. ФКВ 1 и ФКВ 2 – соответствуют изображениям на рис. 5 (а, б). Из анализа таблицы видно, что погрешность для реальных полей, сформированных ФКВ, во всех случаях не превышает двух элементов изображения, что соответствует величине меньше 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.

Таблица 1 - Результаты экспериментальных исследований

Параметр	ФКВ 1	ФКВ 2
Смещение исходного поля, мкм	0.95	2.27
Координата максимума автосвертки, эл.	1218	1246
Рассчитанное через автосвертку смещение ФКВ относительно центрального элемента $x=600$, эл.	9	23
Смещение ФКВ, рассчитанное методом автосвертки, мкм	0.9	2.3
Абсолютная погрешность метода автосвертки, мкм	-0.05	0.03
Относительная погрешность метода автосвертки, %	-5.2	1.3

Выводы. В данной работе разработан метод контроля позиционирования фотонно-кристаллических волокон, основанный на анализе измеренного распределения интенсивности оптического поля и вычислении автосвертки его дискретных значений. Возможности метода были исследованы моделированием на ЭВМ. Также проведены экспериментальные исследования на опытных образцах технологического оборудования. 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 меньше 10%.

Список литературы. 1. Филипенко А.И. Исследование применения согласованной фильтрации для идентификации положения сердцевины оптического волокна // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць.- Харків: НТУ “ХП”.- 2004.- Вип.2(9).- С.233-242. 2. Филипенко А.И. Использование автосвертки распределения оптического поля для идентификации положения сердцевины оптических волокон при их соединении // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.-Харьков: ХНУРЭ.- 2003.-Вып.132.-С.109-114. 3. Filipenko A., Nevludov I. Core position identification of the optical fibers connection by an autoconvolution method // Proceedings of SPIE: Advanced optoelectronics and lasers.- 2004.- Vol.5582.-P.269-277.