

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В. Е. Овчаренко<sup>1</sup>, И.Ш. Невлюдов<sup>2</sup>, О.В. Сычева<sup>2</sup>, С.О. Афанасиевский<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Научно-исследовательский технологический институт приборостроения

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиэлектроники

Контроль геометрических параметров места сварки оптических волокон выполняется методом фокусировки поперечного зондирующего пучка. Рассмотрены параметры формы, определяющие потери оптической мощности в месте сварки оптических волокон. Предложен алгоритм обработки измеренного изображения сварного соединения световодов и выделения контуров оболочки и оси сердцевины волокон.

### 1. Общая характеристика проблемы

При монтаже волоконно-оптических линий связи с расстоянием между ретрансляторами порядка десятков километров необходимо отдельные волоконные световоды соединять между собой. Это связано с тем, что строительная длина волокна обычно не превышает нескольких километров [1]. В этих и во многих других случаях при монтаже различных световодных систем часто возникает необходимость в осуществлении неразъемных соединений световодов. Одним из способов получения неразъемного соединения является сварка [2]. После выполнения операции сварки встает задача контроля оптико-геометрических параметров шва, которые определяют потери оптической мощности и полосу пропускания. При этом из-за большой длины световодов затруднительно использовать традиционные методы контроля оптических потерь, основанные на вводе сигнала с одного конца и его анализе на выходном конце. Актуальной задачей является разработка методов, свободных от данного недостатка, т.е. позволяющих по оптико-геометрическим параметрам сростка определить ожидаемый уровень потерь.

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

Качество сварки характеризуется вносимыми потерями оптической мощности, которые определяются

$$A = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}, \text{ дБ} \quad (1)$$

где  $P_1$  – мощность излучения, введенного в световод;  $P_2$  – мощность излучения на выходе световода.

Вносимые потери подразделяются на внутренние и внешние [3]. Внешние потери возникают вследствие несовершенства самого процесса сварки. Они включают осевое, угловое отклонение, загрязнение и деформацию сердцевины волокон. Наиболее существенной причиной внешних потерь является радиальная несогласованность свариваемых волокон (рис.1). Например, несогласованность осей двух волокон, имеющих диаметр поперечного сечения сердцевины 50 мкм, составляющая 5 мкм, приведет к потерям, равным 0,6 дБ [2]. Потери при радиальном смещении определяются

$$a_L = -10 \lg \left( 1 - \frac{4}{\pi} \cdot \frac{L}{D} \right), \text{ дБ} \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр сердцевины волокна;  $L$  – радиальное смещение.

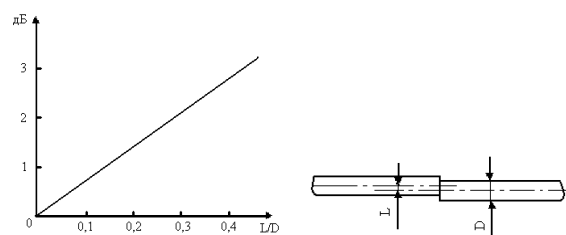


Рис.1. Зависимость потерь от радиальной несогласованности свариваемых ОВ

Потери при угловой несогласованности (рис.2) определяются

$$a_\theta = -10 \lg \left( 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\theta}{\arcsin NA} \right), \text{ дБ} \quad (3)$$

где  $\theta$  – угловое смещение;  $NA$  – числовая апертура.

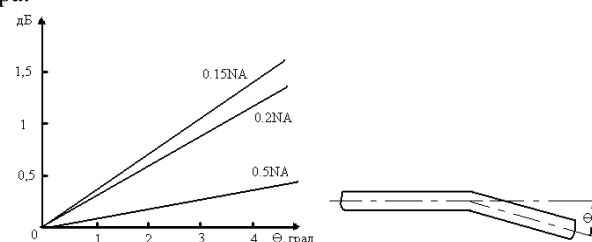


Рис.2. Зависимость потерь от угловой несогласованности свариваемых ОВ

Влияние несогласованности может быть уменьшено благодаря качеству автоматического сближения и выравнивания волокон и циклам сварки при использовании современных сварочных аппаратов-автоматов.

Внутренние потери определяются парным различием эксцентриситетов, диаметров (концентричности) и показателей преломления у сращиваемых волокон. В большинстве сварочных аппаратов осуществляется выравнивание по осям и, таким образом, ослабляется фактор наличия разности эксцентриситетов. Однако устранить потери из-за скачка диаметров затруднительно. Эти потери зависят от направления и возникают, когда свет переходит из волокна с большим диаметром в волокно с меньшим диаметром (рис.3). Потери, обусловленные различием диаметров, определяются

$$a_D = -10 \lg \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2, \text{ дБ} \quad (4)$$

где  $D_1$  – диаметр большего излучающего волокна;

$D_2$  – диаметр приемного волокна.

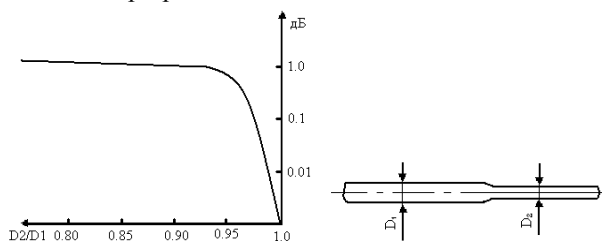


Рис.3. Зависимость потерь от разницы в диаметрах сечений сердцевин свариваемых волокон

Различие в диаметрах сечения оболочек свариваемых волокон может быть причиной радиальной несогласованности, если для их юстировки используют V-образные канавки.

Потери оптического сигнала в основном зависят от позиционирования оптических волокон. Превышение допустимых значений смещений приводит к значительному росту вносимых оптических потерь. Поэтому перед сваркой волокон выполняется юстировка ОВ. Методы юстировки можно классифицировать следующим образом: методы юстировки ОВ по внешнему диаметру оболочки, иммерсионно-оптический метод, метод юстировки по максимуму пропускаемой мощности (LID система), юстировка по методу флуоресценции сердцевины и метод фокусировки (PAS система).

Наиболее распространенный метод автоматической юстировки основан на системе PAS. Его суть заключается в освещении ОВ пучком коллимированного некогерентного света так, что кварцевые оболочка и жила волокна фокусируют свет, действуя как цилиндрические линзы. Лучи, проходящие через одномодовое волокно практически не испытывают преломления на границах сердцевина-оболочка вследствие малой разности в показателях преломления сердцевины и оболочки. Часть лучей, проходящих на расстоянии от центра сердцевины, близком к радиусу сердцевины, претерпевают преломление на границах сердцевина-оболочка, вследствие чего в небольшой области за сердцевиной возникают провалы в распределении плотности световой энергии, которые в плоскости изображения наблюдаются в виде темных линий на светлом фоне. Юстировка ОВ заключается в совмещении темных линий, соответствующих границам сердцевины первого и второго ОВ. При этом формируется изображение, на котором видны границы оболочки и световедущей жилы волокна, что позволяет определить эксцентриситет в каждом из соединяемых волокон. Погрешность совмещения темных линий сопоставима с величиной разрешающей способности объектива. Преимуществами метода являются:

- возможность реализации в полевых условиях в отличие от LID системы и иммерсионно-оптического метода;
- используется для ОВ, изготовленных из различных материалов, тогда как, например, метод флуоресценции применим только для ОВ с кварцевыми сердечниками с добавлением германия;
- дает возможность применения некогерентного

облучающего пучка;

- обладает высокой чувствительностью и сохраняет эффективность вплоть до весьма малых диаметров ОВ, что позволяет использовать его для измерения одномодовых ОВ.

Существует большое разнообразие высокоточных сварочных аппаратов, которые позволяют быстро и качественно сваривать волокна в полевых условиях. Различаются аппараты в основном своими эксплуатационными характеристиками, обусловленными методом юстировки волокон и оценкой потерь в сварных соединениях волокон.

Для обеспечения удобства и быстродействия процесса сварки необходимо, чтобы юстировка, сварка и контроль волокон производились одним устройством, что делает актуальной задачу интеграции в сварочном устройстве всех этих функций.

В качестве параметров, учитываемых при оценке потерь в месте сварки ОВ, необходимо использовать смещение сердцевины, их наклон, изменение диаметра в месте стыка, эксцентриситет сердцевины относительно оболочки. Технология контроля параметров сварных соединений ОВ аналогична задаче контроля оптико-геометрических параметров самих оптических волокон и должна быть основана на специальных автоматизированных методах. Погрешность измерений в этом случае не должна превышать единиц процентов контролируемых величин, что составляет десятки доли микрометра. Использование контактных методов не обеспечивает требуемых точности и быстродействия контроля, поэтому широкое применение получили бесконтактные оптические методы. Бесконтактные методы измерения оптико-геометрических параметров ОВ характеризуются значительным разнообразием и достаточно простой физической реализацией. За последние годы было разработано большое число бесконтактных оптических методов, базирующихся на различных оптических явлениях: с применением микроскопов, теневые, ближнего поля, поляризационные, дальнего поля, дифракционный, интерференционный и голографический и др.[4].

На основе выполненного анализа можно сделать вывод, что наиболее приемлемым для применения в полевых условиях непосредственно после процесса сварки является использование метода фокусировки, что позволяет использовать имеющуюся в сварочном аппарате оптическую систему, а в отдельных случаях и блок восприятия изображения с микроконтроллером. В данном случае требуется разработка специальных цифровых процедур, позволяющих по полученному изображению сварного соединения определить вносимые потери оптической мощности.

### 3. Постановка задачи

Целью исследований является создание математической методики и алгоритма определения параметров формы сварного соединения оптических волокон. Данная цель достигается решением следующих задач: разработкой структуры блока восприятия изображения соединения, методики предварительной обработки изображения для исключения шумов измерений, методики выделения границ областей оптических волокон и определения на этой основе параметров рас-

согласования волокон.

#### 4. Теоретические основы технологии контроля

Определение оптико-геометрических параметров сварного соединения оптических волокон методом фокусировки основано на измерении распределения интенсивности излучения волокон матрицей элементов приемника с зарядовой связью (ПЗС), цифровом преобразовании и дальнейшей обработке полученного изображения. Место соединения волокон облучается световым коллимированным пучком под прямым углом к оси оптоволокон. Зондирующий луч, входящий в сердцевину волокна, которая действует как цилиндрическая линза, преломляется и выходит из сердцевины. Далее излучение через оптическую систему попадает в матрицу ПЗС, откуда после аналого-цифрового преобразования изображение поступает на персональный компьютер (ПК) или контроллер для последующего исследования параметров сварного соединения. На рис. 4 представлена структурная схема устройства, предназначенного для получения и обработки изображения сварного соединения оптических волокон.

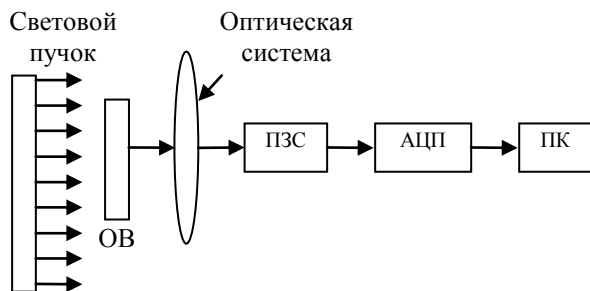


Рис.4. Структурная схема устройства контроля сварных соединений оптических волокон

Полученное в такой системе изображение представлено на рис. 5. В данном изображении из-за влияния различных помех сердцевина не имеет четких границ, что может привести к значительным погрешностям дальнейших вычислений. Смесь сигнала и шумовых составляющих можно представить в виде

$$\xi(x, y) = I(x, y) + n(x, y) + I_0(x, y), \quad (5)$$

где  $I(x, y)$  – полезный сигнал;  $n(x, y)$  – шумовая составляющая;  $I_0(x, y)$  – фоновая составляющая.

Для надежного определения оптико-геометрических параметров сварного соединения ОВ

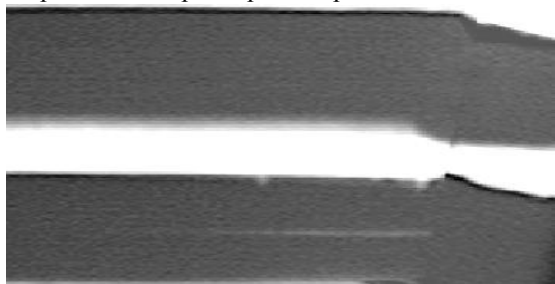


Рис.5. Изображение дефектного сварного соединения ОВ

необходимо осуществить предварительную обработку изображения с целью исключения шумовых компо-

нентов, а также удалить фоновую составляющую, которая не несет положительной информации и является источником дополнительной погрешности.

После предварительной обработки измеренного изображения можно вычислять необходимые геометрические параметры сварного соединения, а затем и вносимые потери.

Схема алгоритма обработки полученного изображения показана на рис.6.

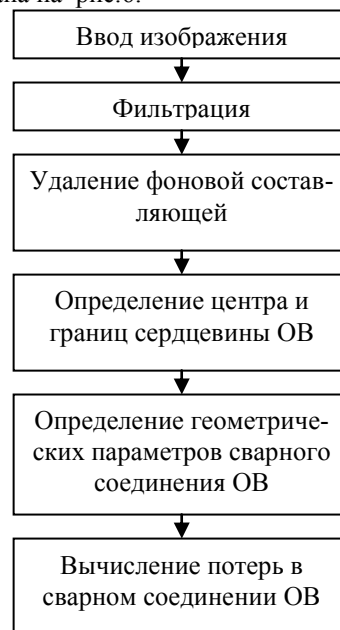


Рис.6. Схема алгоритма обработки полученного изображения

В измеренном распределении интенсивности излучения, представленном на рис. 7, присутствуют высокочастотные и импульсные шумы, обусловленные различными загрязнениями оптических поверхностей устройств, неравномерностью чувствительности фотоприемника, дефектами объекта контроля, колебаний питающего напряжения. Устранение шума может быть выполнено применением цифрового фильтра нижних частот. Для выбора фильтра рассмотрим свойства некоторых из них [5]. Эллиптические фильтры характеризуются тем, что их амплитудная характеристика имеет равновеликие пульсации и в полосе пропускания, и в полосе подавления. Несмотря на минимальную ширину переходной полосы, т. е. быстрого перехода от полосы пропускания к полосе подавления, данный фильтр не отвечает необхо-

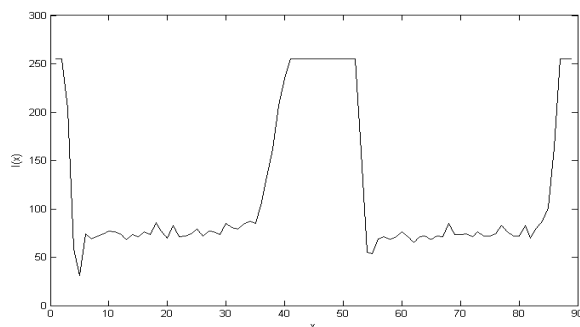


Рис.7. Распределение интенсивности излучения до фильтрации

димым требованиям по сглаживанию заданного распределения.

Отличительной чертой фильтров Чебышева является наименьшая величина максимальной ошибки аппроксимации в заданной полосе частот. Ошибка аппроксимации представляется в заданной полосе равновеликими пульсациями, т.е. она флуктуирует между максимумами и минимумами равной величины. В зависимости от того, где минимизируется ошибка аппроксимации – в полосе пропускания или в полосе непропускания, – различают фильтры Чебышева 1 и 2 типа. Фильтры Чебышева 1 типа обеспечивают равновеликие пульсации амплитудной характеристики в полосе пропускания и монотонное изменение ослабления в полосе подавления. Фильтры Чебышева 2 типа обеспечивают монотонное изменение ослабления в полосе пропускания и равновеликие пульсации в полосе подавления. Пульсации и монотонное изменение ослабления, как в полосе пропускания, так и в полосе подавления не позволяет получить распределение с оптимальными параметрами.

Наиболее приемлемым для решения поставленной задачи является фильтр Баттерворта. Фильтры Баттерворта нижних частот характеризуются тем, что имеют максимально гладкую амплитудную характеристику в полосе пропускания и в полосе подавления, а также хорошие параметры по изменению ослабления.

Свойства фильтра Баттерворта нижних частот:

- фильтры Баттерворта имеют только полюсы (все нули передаточных функций этих фильтров расположены на бесконечности);

- на частоте  $\Omega = 1$  рад/с коэффициент передачи фильтров Баттерворта равен  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  (т. е. на частоте среза их амплитудная характеристика спадает на 3дБ);

- порядок фильтра  $n$  полностью определяет весь фильтр.

Амплитудная и фазовая характеристики фильтра Баттерворта представлены на рис. 8.

Необходимо выбрать такой фильтр Баттерворта, который обеспечивал бы прохождение информационной составляющей сигнала  $I(x)$  при максимальном подавлении искажений. Для этого проведено моделирование с помощью пакета Matlab.

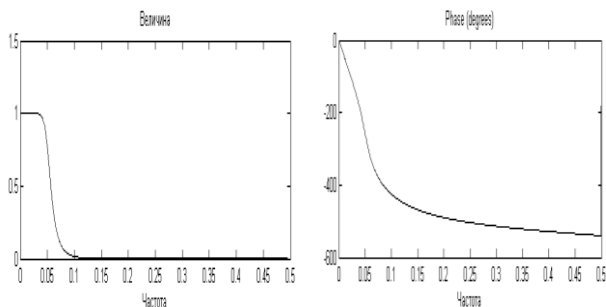


Рис.8. АЧХ и ФЧХ фильтра Баттерворта нижних частот

На рис. 9 представлены сглаженные с помощью фильтров Баттерворта различных порядков и частотных характеристик распределения интенсивности излучения.

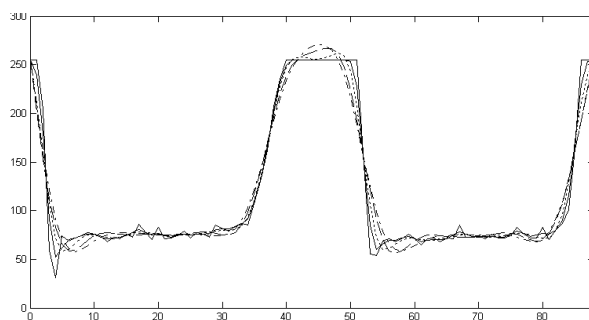


Рис.9. Распределения интенсивности после фильтрации

Наиболее приемлемым является распределение, полученное при использовании фильтра Баттерворта первого порядка. При этом обеспечиваются наименьшие потери полезного сигнала и необходимое подавление помех. Применив выбранный фильтр ко всему распределению получено изображение, приведенное на рис. 10.

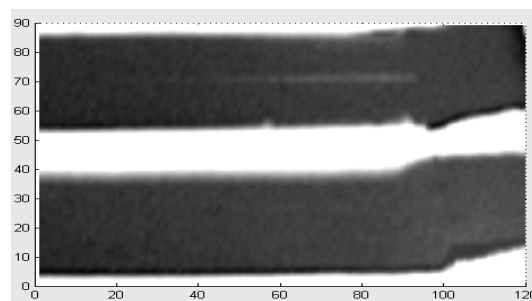


Рис.10. Изображение ОВ после фильтрации

Для более точного определения центра и границ сердцевины оптоволоконна необходимо удалить фоновую составляющую, которая не несет положительной информации и является источником погрешности. При этом пороговое значение интенсивности распределения определяется условием

$$I_{\text{пор}} = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \cdot 0.3, \quad (6)$$

где  $I_{\text{max}}$  и  $I_{\text{min}}$  – максимальное и минимальное значения интенсивности распределения соответственно.

Полученный результат моделирования для одного поперечного сечения представлен на рис. 11.

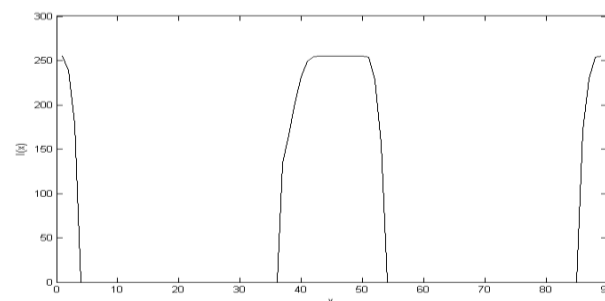


Рис.11. Распределение интенсивности без фоновой составляющей

Координата центра сердцевины оптоволоконна  $X_c$  может быть определена как центр тяжести распределения [6] по формуле

$$X_c = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot I(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(x) dx}, \quad (7)$$

где  $I(x)$  – интенсивность распределения в точке с координатой  $x$ .

Границы сердцевины определяются рассеянием значений интенсивности от центра распределения

$$D = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \cdot I(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(x) dx} - X_c^2. \quad (8)$$

Так как в качестве устройства, осуществляющего дискретизацию изображения, используется матрица элементов ПЗС, то указанные характеристики представляются в дискретном виде

$$X_c = \frac{\sum I(x) \cdot x}{\sum I(x)}, \quad (9)$$

$$D = \frac{\sum I(x) \cdot x^2}{\sum I(x)} - X_c^2 \quad (10)$$

С помощью разработанной программы осуществлено выделение указанных параметров (рис. 12).

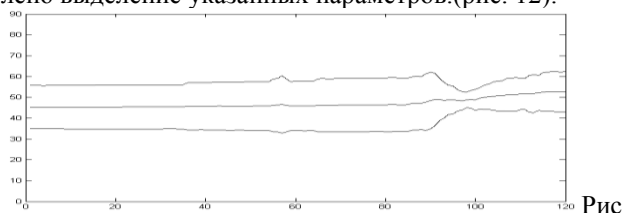


Рис. 12. Результат нахождения центра и границ сердцевины ОВ

## 6. Выводы

Проведен сравнительный анализ существующих бесконтактных методов контроля оптических волокон, рассмотрены различные методы юстировки ОВ. В качестве наиболее оптимального для исследования сварных соединений ОВ в полевых условиях, выбран метод фокусировки. Построена структурная схема устройства формирования изображения сварного соединения ОВ. Разработан алгоритм обработки измеренного изображения, основными блоками которого являются: фильтрация, удаление фона, вычисление параметров сварного соединения ОВ. Для устранения воздействия шумов и обеспечения точных измерений выполняется обработка изображения фильтром Баттерворта нижних частот первого порядка. Разработана методика и программное обеспечение для выделения координат центра и границ сердцевины оптического волокна.

Дальнейшие исследования направлены на разработку методики определения величин смещений сердцевин и отклонений диаметров оптических волокон по изображению выделенных границ и осей сердцевин волокон.

## Литература:

1. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем / А. Ф. Котюк, Ю. А. Курчатова, Ю. П. Майборода и др.; Под ред. А. Ф. Котюка. – М.: Радио и связь, 1987.–224с.
2. Красюк Б. А., Корнеев Г. И. Оптические системы связи и световодные датчики. Вопросы технологии. – М.: Радио и связь, 1985.–192с.
3. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Л.М. Андрушко, В.А. Вознесенский, В.Б. Коток и др.; Под ред. С.В. Свечникова и Л.М. Андрушко.–К.: Техника, 1988.–239с.
4. Лазарев Л. П., Мировицкая С. Д. Контроль геометрических и оптических параметров волокон. – М.: Радио и связь, 1988.– 280с.
5. Рабинер Л., Голд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978.–848с.
6. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.–304с.
7. Филипенко А.И. Метод анализа интенсивности излучения и его использование в производстве волоконно-оптических компонентов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.–Вып.110.–1999.–С.130-133.