

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОГО ВОЛОКНА ОПТИЧЕСКИМ ОТРАЖАТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Введение

Трудоемким этапом процесса оптического контроля микроструктурированных (МС) волокон и компонентов на их основе отражательным методом является анализ полученного изображения. Результатом технической части эксперимента является снимок торца МС волокна [1]. Таким образом, задачей настоящего исследования является анализ цифрового изображения.

Процедура улучшения изображений в данном случае сводится к выполнению комплекса операций с целью преобразования его в форму, удобную для компьютерного анализа.

Существует множество операций обработки цифровых изображений, однако последовательность этапов и методы обработки определяются исходя из конкретно поставленной задачи.

Постановка задачи

При выполнении контроля геометрических параметров торца МС волокна оптическим отражательным методом [2] информация извлекается с изображения, зафиксированного ПЗС-камерой, и передается в память компьютера. Таким образом, открываются новые возможности применения мощных средств обработки изображений с применением вычислительной техники. Следовательно, повышается качество, скорость и точность процесса контроля.

Процедура цифровой обработки изображений обычно включает два этапа:

- этап предварительной обработки цифрового изображения;
- этап решения задачи обнаружения, распознавания или измерения параметров объектов на изображении.

Такое разделение носит условный характер, так как одни и те же математические операции могут быть использованы на обоих этапах.

Обычно предварительная обработка изображений преследует, как минимум, одну из следующих целей:

- сокращение объёма информации, предназначенной для дальнейшей обработки;
- фильтрацию помех, затрудняющих последующую обработку;
- выделение признаков контролируемых объектов для упрощения дальнейшей процедуры распознавания.

Цель работы – разработка алгоритмов цифровой обработки, позволяющих улучшить качество изображения торца МС волокна, получаемого с помощью разработанного средства контроля [1].

Математические характеристики изображения

Математически монохромное изображение удобно представлять как функцию двух переменных $z = f(x, y)$, описывающую распределение яркости на плоскости проецирования. Предполагается, что эта функция непрерывна и задана в некоторой прямоугольной области, называемой полем зрения, а также является гладкой, т. е. имеющей производную в любой точке, неотрицательной и ограниченной сверху. Как правило, начало координат задается в центре поля зрения. Полихромное изображение, т. е. цветное, можно представить как три отдельные функции z_r, z_g, z_b , аналогично z описывающие распределение трех основных цветов. В нашем случае работы ведутся с монохромным изображением.

При компьютерной обработке изображение представляется прямоугольной матрицей $Z [M, N]$, элементы которой – целые неотрицательные числа, а общее число элементов $S = M \cdot N$. Значение каждого элемента определяется средней яркостью некоторой области изображения, называемой пикселем. В соответствии с общепринятым отсчетом элементов мат-

рицы начало координат дискретного изображения оказывается в левом верхнем углу дискретного поля зрения.

Для получения изображения, пригодного для цифровой обработки, необходимо провести дискретизацию исходного непрерывного изображения $f(x, y)$, а также выполнить квантование аналогового сигнала, соответствующего среднему уровню яркости пикселя, для получения целочисленного значения z . Первое условие достигается за счет использования матрицы или линейки с необходимым числом светочувствительных элементов. А второе – за счет использования аналого-цифровых преобразователей требуемой разрядности.

Что касается характеристик изображения, то наиболее легко определяемыми из них являются максимальная и минимальная яркость (z_{min} , z_{max}). Их диапазон определяет контрастность изображения и пределы ее увеличения.

К статистическим характеристикам дискретного изображения относятся средняя яркость [3]

$$z_{cp} = 1/S \sum_{m,n=1}^{M,N} z(m,n), \quad (1)$$

дисперсия яркости

$$D = 1/S \sum_{m,n=1}^{M,N} [z(m,n) - z_{cp}]^2, \quad (2)$$

а также центр яркости

$$m_c = \frac{1}{z_{cp} S} \sum_{m,n=1}^{M,N} mz(m,n); \quad n_c = \frac{1}{z_{cp} S} \sum_{m,n=1}^{M,N} nz(m,n). \quad (3)$$

При анализе изображений широко применяются гистограммы яркости $B(z)$ – зависимость числа одинаковых значений яркости в анализируемом дискретном изображении, соответствующих какому-либо уровню квантования сигнала, от этого уровня [3]:

$$S(h) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N K_{ij}; \quad K_{ij} = \begin{cases} 1, & E_{ij} = h \\ 0, & E_{ij} \neq h \end{cases}$$

1); H – число, где $h=0, 1, 2, \dots, H$ -уровней квантования сигнала.

Причем форма гистограммы существенно зависит от вида изображения. Например (рис. 1), для изображения торца МС волокна на ровном фоне соответствует сглаженная бимодальная гистограмма.

Оценить локальную резкость, т. е. отношение перепада яркостей на некотором фрагменте изображения к величине фрагмента, позволяет срез функции яркости по горизонтали или вертикали (рис. 1, z).

При анализе пространственно-яркостной структуры изображения часто используется его амплитудно-частотная характеристика, которая может быть получена путем разложения

функции яркости в ряд по базису Фурье $\Phi(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \exp[-i(\omega_x x + \omega_y y)] dx dy$.

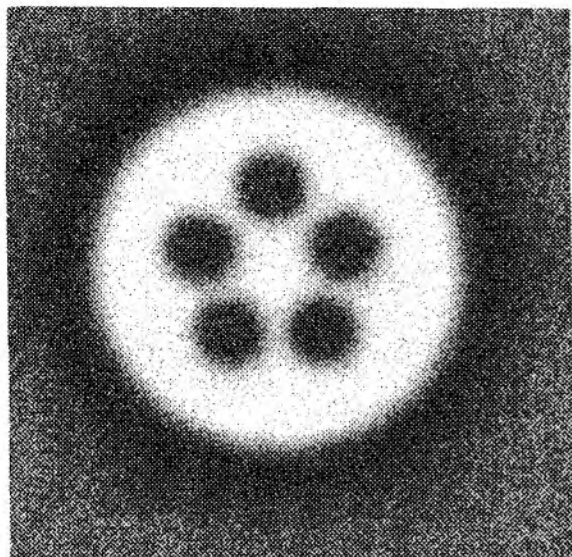
Обратное преобразование имеет вид

$$f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega_x, \omega_y) \exp[i(\omega_x x + \omega_y y)] d\omega_x d\omega_y,$$

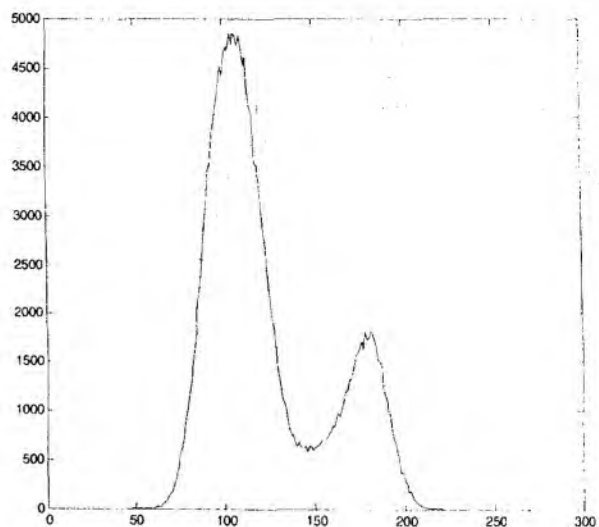
где $i = \sqrt{-1}$; ω_x, ω_y – круговые пространственные частоты спектра в направлении осей X и Y .

Для дискретного изображения, представленного в виде квадратной матрицы $Z [N, N]$, операции интегрирования заменяются суммированием, а дискретное преобразование Фурье

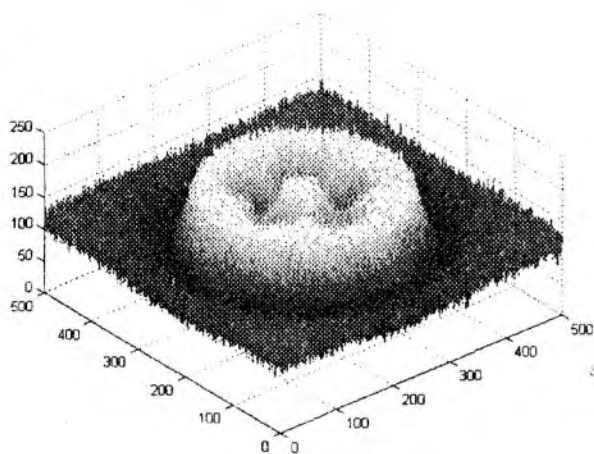
имеет вид $\Phi(k,l) = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} z(n,m) \exp[-i \frac{2\pi}{N} (kn + lm)]$.



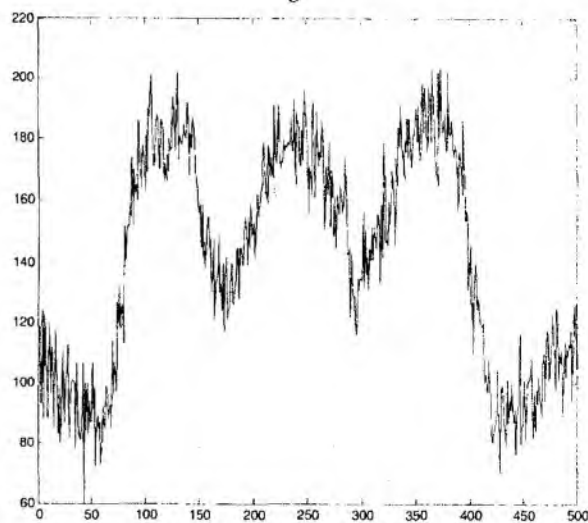
a



б



в



г

Рис. 1. *a* – изображение торца МС волокна, *б* – соответствующая гистограмма яркостей, *в* – трехмерный рисунок распределения яркости, *г* – срез функции яркости

Амплитудно-частотная характеристика изображения позволяет оценить степень резкости изображения и наличие мелких объектов, так как именно высокочастотные составляющие определяются контурами, которые и несут основную информацию об объектах. Следует отметить, что контурные линии определяются фазовой составляющей спектра.

В результате дискретизации и квантования в изображение неизбежно вносятся искажения, величина которых определяется, во-первых, характеристиками изображения, а во-вторых – параметрами оцифровки, главным образом, шкалой квантования и плотностью растровых отсчетов. При выборе параметров оцифровки изображения следует исходить из того, для каких целей в дальнейшем это изображение будет использоваться. Неправильный выбор этих параметров может, с одной стороны, привести к неоправданно большому объему памяти, необходимой для хранения изображения, а с другой – к недопустимо большому уровню искажений, которые в дальнейшем уже не могут быть исправлены.

Квантование уровня яркости, как правило, производится по 256 уровням. Следует отметить, что недостаточное количество уровней квантования вносит в дискретное изображение искажения, которые проявляются в виде так называемых ложных контуров.

Что касается выбора уровня дискретизации изображения, то в соответствии с теоремой Котельникова размер пикселя не должен превышать половины размера минимальной детали изображения. На практике для уменьшения влияния помех размер пикселя выбирается таким, чтобы линейные размеры минимальной детали составляли не менее 4 – 6 пикселей.

Следует отметить, что проблема коррекции яркостных искажений тесно связана с вопросами сегментации, т. е. отнесения точек изображения к фону или отдельным фрагментам, каждый из которых в дальнейшем анализируется отдельно. В самом деле, для успешной коррекции помех необходимо иметь некоторую априорную информацию о «полезном» изображении и характеристиках помех, в какой-то мере аналогичную априорной информации о сегментируемых фрагментах и фоне. Очевидно, что чем детальнее эта информация, тем результативнее процесс обработки изображения.

Однако затруднительно дать универсальное, применимое на практике определение помех. Приходится в каждом конкретном случае давать некоторое описание помехи и полезного сигнала, что не позволяет найти универсальный метод определения вносимых помех.

Модель возникновения искажений на изображении

Процесс ухудшения изображения можно смоделировать в виде функции искажения, которая вместе с аддитивным шумом действует на исходное изображение $f(x,y)$ и порождает искаженное изображение $g(x,y)$ (рис. 2)

$$g(x, y) = H[f(x, y)] + \gamma(x, y).$$

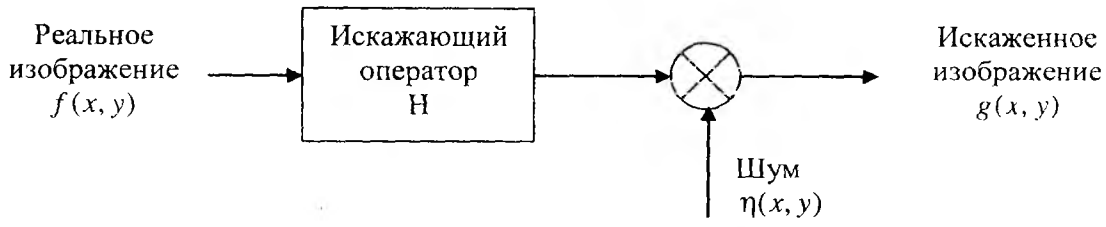


Рис. 2. Модель процесса искажения изображения

Имея функцию $g(x,y)$, обладая некоторой информацией об искажающем операторе H и зная основные характеристики аддитивного шума $\gamma(x, y)$, можно построить некоторое приближение $f(x, y)$ исходного изображения. Целью восстановления изображения является построение приближения, которое было бы максимально близко к исходному изображению. При этом, чем больше мы знаем об операторе H и шуме $\gamma(x, y)$, тем точнее можно приблизиться к реальному изображению.

Если известно, что H -линейный трансляционно-инвариантный оператор, то можно показать математически, что искаженное изображение представимо в пространственной области:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + \gamma(x, y),$$

где $h(x,y)$ – это пространственное представление искажающего оператора. Свертка функций в пространственной области эквивалентна умножению в частотной области преобразований Фурье этих функций, поэтому приведенное выше уравнение модели искажения можно записать в эквивалентном представлении в частотной области

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v).$$

Излучение световода является дифракционно-ограниченным, то есть торец играет роль диафрагмы. В этом случае амплитуда дифракционного поля в одномерном варианте в приближении Френеля (понятие “ближней зоны”), которое задается условиями [4]

$$Z_0 \leq \frac{a^2}{4n^2\lambda}, \quad -a + 2\sqrt{Z_0\lambda} < X_0 < a - 2\sqrt{Z_0\lambda},$$

определяется соотношением

$$r(x_0, z_0) = \frac{1}{\sqrt{Z_0 \lambda}} \exp \left[i(kZ_0 - \frac{\pi}{4}) \right] \int_{-a}^a E(\xi) \exp \left[\frac{ik(x_0 - \xi)^2}{2Z_0} \right] d\xi,$$

где $E(\xi)$ – амплитуда поля на входе ограничивающей диафрагмы (торец световода); (x_0, z_0) – координаты точки наблюдения; λ – рабочая длина волны распространяющегося излучения; k – волновое число; a – радиус ограничения светового пучка.

Отсюда видно, что поле $r(x_0)$, создаваемое плоскостью торца МС волокна, в области Френеля выражается соотношением [4]

$$r(x) = \int_{-a}^{+a} f(x) e^{jk(x-x_0)^2 / 2z_0} dx.$$

Поскольку $r(x)=0$ для $|x| > b$, то приведенное соотношение является интегралом свертки

$$r(x) = f(x) * e^{j\alpha x^2},$$

где $\alpha = \frac{k}{2z_s}$.

Другими словами, поле $r(x)$ на плоскости $z = z_s$ во френелевской области объекта $f(x)$ можно рассматривать как сигнал на выходе линейной системы, на вход которой подается сигнал $f(x)$. При этом система имеет импульсную реакцию $e^{j\alpha x^2}$, $\alpha = \frac{k}{2z_s} = \frac{\pi}{\lambda z_s}$.

Линза с фокусным расстоянием f эквивалентна транспаранту с функцией пропускания

$$T(x) = e^{-j\beta x^2}, \quad \beta = \frac{k}{2f}.$$

Это справедливо только для области конечного размера линзы.

Получаем, что поле на плоскости, касательной к линзе и расположенной от нее справа, при падающем поле $r(x)$ имеет вид

$$a(x) = r(x) e^{-j\beta x^2}.$$

А поле $g(x)$ на плоскости, расположенной на расстоянии $z = z_0$ от линзы будет иметь вид

$$g(x) = [r(x) e^{-j\beta x^2}] * e^{j\gamma x^2}, \quad \gamma = \frac{k}{2z_0}.$$

Пусть объект (торец МС волокна) расположен на расстоянии z_s от линзы L . Определим изображение $g(x)$ объекта $f(x)$ в плоскости изображения P_0 , для которой (рис. 3).

$$\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_s} = \frac{1}{f}. \tag{4}$$

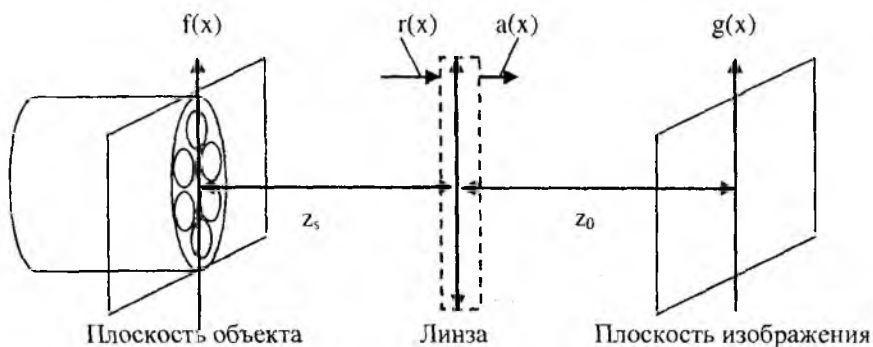


Рис. 3. Схема оптической системы

Таким образом, имеем

$$g(x) = \{ \{ f(x) * e^{-j\alpha x^2} \} e^{-j\beta x^2} \} * e^{j\gamma x^2},$$

где

$$\alpha = \frac{k}{2z_s}, \beta = \frac{k}{2f}, \gamma = \frac{k}{2z_0}.$$

Условие (4) эквивалентно соотношению $\gamma + \alpha = \beta$.

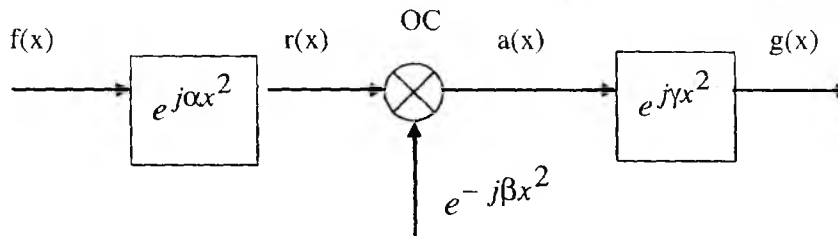


Рис. 4. Блок-схема оптической системы

Это выражение после преобразований приводит к соотношению

$$g(x_0) = E \left(-\frac{Z_s x_0}{Z_0} \right) \cdot h \left(-\frac{Z_s x_0}{Z_0} \right),$$

где $h(x) = \frac{\sin(2\pi b x / Z_s \lambda)}{\pi x}$ является импульсной реакцией оптической системы, а частотная

характеристика оптической системы имеет вид $H(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \frac{2\pi b}{\lambda Z_s} \\ 0, & |\omega| > \frac{2\pi b}{\lambda Z_s} \end{cases}$.

Следовательно, распределение амплитуды поля в плоскости фотоприемника является сверткой распределения напряженности модового поля (увеличенного в соответствии с масштабным коэффициентом) и импульсной реакции оптической системы.

Таким образом, определены основные этапы обработки изображения, полученного в процессе контроля геометрических параметров МС волокон:

- получение полутонового изображения;
- адаптивная настройка контраста, преобразование яркости изображения;
- устранение шумовой составляющей изображения (фильтрация);
- пороговая обработка для создания бинарного изображения;
- сегментация изображения;
- морфологическая обработка изображения;
- распознавание образов;
- анализ полученной информации.

Выводы

Проанализированы физические процессы получения изображения торца МС волокна в процессе контроля геометрических параметров отражательным оптическим методом. На основании чего сделаны выводы о присутствии на выходном изображении импульсных высокочастотных, аддитивных шумов. Приведена математическая модель возникновения шумов на изображении.

В результате исследования разработана методика обработки изображения, полученного в процессе контроля геометрических параметров МС волокон.

Дальнейшее направление работы связано с подбором необходимых фильтров, для устранения шумов, разработкой алгоритмов и программной реализации полученной методики.

Список литературы: 1 *Современное состояние проблемы контроля конструктивно-геометрических параметров микроструктурированных оптических волокон / А. И. Филипенко, А. В. Пономарева // Радиотехника: Всеукр.межвед. науч.-техн. сб. 2008. Вып.154. С. 102-107.* 2. *Лазарев Л. П., Мировицкая С.Д. Контроль геометрических и оптических параметров волокон. М.: Радио и связь, 1988. 280 с.* 3. *Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.* 4. *Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971. 495 с.*

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 17.01.2009