УДК 621.317.082.5

А.И. ФИЛИПЕНКО, канд. техн. наук

МЕТОД АНАЛИЗА ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В производстве компонентов волоконно-оптических систем передачи информации (оптических волокон, оптических соединителей, переключателей, ответвителей и т. д.) необходимо выполнять анализ распределения интенсивности излучения оптических волокон с целью установить оптические и геометрические характеристики компонентов. Специфика решения данной задачи обусловлена несколькими факторами: во-первых, тем обстоятельством, что поперечные геометрические размеры области излучения незначительно отличаются или сравнимы с длиной волны излучения; во-вторых, методами и аппаратурой, которые используются для измерения характеристик, связанных с распределением поля; в-третьих, применяемыми численными процедурами обработки результатов измерений. Качество выполнения технологических операций в значительной мере зависит от точности воспроизведения распределения оптического поля в критичных плоскостях сечения. Непосредственно для измерения распределения интенсивности применяются, как правило, методы ближнего или дальнего поля. Сканирование выполняется многоэлементными фотоприемниками (линейными или матричными фоточувствительными приборами с зарядовой связью) либо перемещаемыми прецизионными микроподвижками точечными фотоприемниками. Анализируя информацию фотодатчика, исследователь имеет дело не с непосредственным распределением оптического поля по интересующему его сечению, а с распределением, которое является результатом преобразования исходного распределения линейной системой (измерительным прибором) и описывается интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода

$$g(y) = \int_{-\infty}^{\infty} E_{NF}(x)h(y-x)dx, \qquad (1)$$

где $E_{NF}(x)$ – напряженность электрической составляющей оптического поля излучения оптического волокна; $h(x)$ – импульсная характеристика системы. Для получения действительного распределения поля в интересующем сечении (например, в плоскости соединения двух оптических волокон) необходимо решить обратную задачу с целью восстановить $E_{NF}(x)$ по результатам измерения $g(y)$. Восстановление, в свою очередь, выполняется с некоторой погрешностью ε, чем обусловлена некорректность обратной задачи.

Решение данной задачи предлагается осуществлять методом минимизации риска на выборках конечного объема, который удовлетворяет определенному компромиссу между значением величины, характеризующей "сложность" входного воздействия, и невязкой по результатам сканирования поля $g(y)$. Решение целесообразно представлять в классе линейных по параметрам функций рядом ортогональных функций j_n вида [1]

$$E_{NF}(x) = \sum_{n=0}^{N} c_n \varphi_n^{\alpha}(x) . \qquad (2)$$

Ортогональным базисом в данном случае служат функции Лагерра [1]

$$\varphi_n^{\alpha}(x) = \exp\left(-\frac{x}{2}\right) x^{\alpha} L_n^{\alpha}(x) , \qquad (3)$$

где $L_n^{\alpha}(x)$ – обобщенный полином Лагерра.

Количество слагаемых определяется минимизацией функционала эмпирического риска [2]

$$J(n) = \frac{I_e(c)}{1 - \sqrt{\dfrac{(N+1)(\ln M - \ln(N+1) + 1) - \ln \eta}{M}}} . \qquad (4)$$

Здесь η – вероятность, с которой справедлива эта оценка; M – количество точек измерения распределения $g(y)$; $I_e(c)$ – критерий эмпирического риска, который определяется в метрическом пространстве уравнением [2]

$$I_e(c) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \left\{ g(y) - \int_{-\infty}^{\infty} h(y-x) \sum_{n=0}^{N} c_n \varphi_n^{\alpha}(x) dx \right\} , \qquad (5)$$

а его минимальное значение достигается на решении нормальной системы линейных алгебраических уравнений

$$\Phi^T \times \Phi \times C = \Phi^T \times g , \qquad (6)$$

где $\Phi = \{\Psi_n(y_i)\}$ – матрица размера $M \times (N+1)$ значений образов функций Лагерра в экспериментальных точках y_i $(i=1,...,M)$;

$C=(c_0, \ldots c_N)^T$ – искомый вектор коэффициентов разложения приближения решения интегрального уравнения (1) по функциям Лагерра; $g=(g_1, g_2, \ldots, g_M)^T$ – вектор экспериментальных наблюдений распределения интенсивности модового поля.

Значение функционала эмпирического риска, достигаемое на решении нормальной системы, является оценкой качества построения приближенного решения уравнения.

Известное распределение поля излучения волокна в ближней зоне может быть использовано для установления таких геометрических характеристик, как геометрические координаты центра X_C и диаметр модового поля D_m (сердцевины) оптического волокна через соответствующие моменты функции распределения электрической составляющей поля излучения

$$X_C = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\int_0^\infty x E_{NF}^2(x)\,dx}{\int_0^\infty E_{NF}^2(x)\,dx}; \tag{7}$$

$$D_m = \frac{m_2}{m_0} - \left(\frac{m_1}{m_0}\right)^2 = \frac{\int_0^\infty x^2 E_{NF}^2(x)\,dx}{\int_0^\infty E_{NF}^2(x)\,dx} - X_C^2. \tag{8}$$

С помощью изложенного выше подхода и выражений (7), (8) получены соотношения для представления геометрических характеристик через вектор коэффициентов разложения C_n исходного распределения излучения оптического волокна. Оценки координат центра и диаметра модового поля описываются следующими выражениями:

$$X_C^{(N)} = 1 + 2N\left(C_N^*\right)^2 + 2\sum_{n=0}^{N-1} C_n^*\left(nC_n^* - (n+1)C_{n+1}^*\right), \tag{9}$$

где коэффициенты должны быть нормированы так, что $\sum_{n=0}^{N} \left|c_n^*\right|^2 = 1$;

$$D_m^{(N)} = 2\left\{5 + \sum_{n=0}^{N} 4n\left(C_n^*\right)^2 + (N+1)\left[2\left(C_N^*\right)^2 + N\left(C_N^* - C_{N-1}^*\right)^2\right] + \right.$$

$$\left. + \sum_{n=0}^{N} C_n^*(n+1)(n+2)\left(C_n^* - 2C_{n+1}^* + C_{n+2}^*\right) - X_C^2\right\}^{1/2}. \qquad (10)$$

Эффективность и потенциальные возможности метода проверялись моделированием на ПЭВМ с использованием генератора псевдослучайных чисел для имитации погрешностей измерения ε. Во время экспериментов проводились: восстановление исходного распределения электрического поля на базисе ортогональных функций Лагерра при заданных погрешностях измерения; определение значений и погрешностей геометрических параметров – координат центра сердцевины X_C и диаметра модового поля d.

В качестве исходного распределения поля были использованы соотношения, описывающие наиболее распространенные типы ОВ с гауссовым пучком, а также многослойные дисперсионно-модифицированные волокна с профилем показателя преломления W-типа. По соотношению (1), определяющему оператор прямой задачи, рассчитывались значения поля излучения ОВ в плоскости изображения (элемент g (y)). К ним добавлялся шум ε в размере 10 % от измеренного значения. После использования операции восстановления в виде (2) определялись геометрические характеристики X_C и D_m и сравнивались с заданными. При восстановлении распределения поля определялись функционал $J(n)$ и критерий эмпирического риска I_e в зависимости от изменяемого размера базиса восстановления и интервала между отсчетами распределения поля в плоскости контролируемого изображения.

Результаты моделирования показали, что минимальное значение функционала $J(n)$ достигается при 6-м, 7-м порядках полинома восстанавливающей функции для гауссовых волокон и 18 — 20-м порядках для сложнопрофильных волокон. Этим же порядкам соответствуют значения координат геометрического центра и диаметра модового поля, наименее отклоняющиеся от заданных.

Получено количество отсчетов измеряемой функции, которое достаточно для ее восстановления с заданной точностью. Выявлено, что для волокон с гауссовым пучком достаточно осуществлять измерение в точках, которые отстоят друг от друга на $d = (0{,}5 \ldots 0{,}75)\lambda$, где λ – длина волны измерения. Для более сложных профилей интервал

должен быть уменьшен до величины $d = (0{,}05 \ldots 0{,}25)\lambda$. С использованием генератора псевдослучайных чисел оценены математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение (СКО) определения геометрических характеристик X_C и D_m. Систематическая погрешность составляет ± (0,02 ... 0,05) мкм, а достижимый уровень СКО мало различается для волокон разных типов и находится в таких пределах: СКО (X_C) = 0,02 ... 0,05 мкм, СКО (D_m) = 0,05 ... 0,08 мкм.

Список литературы: 1. *Френкс Л.* Теория сигналов: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1974. 343 с. 2. *Алгоритмы* и программы восстановления зависимостей / Под ред. В.Н. Вапника. М.: Наука, 1984. 815 с.

Поступила в редколлегию 14.04.97