

ОПЕРАЦИИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ КОНТРОЛЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН МЕТОДОМ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

Филипенко А.И., Невлюдов И.Ш., Сычева О.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, каф. ТАИР, тел.: (+380-57) 7021486

Results of modeling researches of digital processing operations of optical fibers radiation distribution in a near field are resulted. Optical intensity is used in the wave equation for calculation of refraction index profile. The near field technique is subject to pulse and high-frequency noise at measurement of intensity. For elimination of their influence it is offered to use the Butterworth filter. Modeling researches for definition of Butterworth filters parameters for the most critical under the form of optical fiber field radiation distributions are carried out. Recommendations are determined at the choice of the order and cutoff frequency of the filter. Features of approximation by polynomials of different degrees of the calculated profiles are investigated. Recommendations are given at the choice of a polynomials degree for optical fibers with the different form of a refraction index profile.

Введение. Целью работы является исследование с помощью имитационного моделирования возможностей метода для контроля профиля показателя преломления различных типов оптических волокон, методики восстановления распределения интенсивности поля на торце оптического волокна по результатам измерений его излучения при наличии шумов, а также особенностей аппроксимации профилей, рассчитанных с использованием измеренного распределения интенсивности.

Метод контроля включает измерение многоэлементным ПЗС-фотоприемником распределения интенсивности излучения световода в ближнем поле, фильтрацию полученного распределения и оценивание напряженности оптического поля на торце волокна методом Фурье-преобразования, ее подстановку в выражение [1,2]

$$n^2(x, y) = \frac{\beta^2}{k^2} - \frac{1}{k^2 \cdot E(x, y)} \cdot \left(\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

для расчета профиля показателя преломления с использованием методов численного дифференцирования. Метод ближнего поля подвержен импульсному и высокочастотному шуму при измерении интенсивности, возникающему за счет неравномерности чувствительности и шумов приемников изображения - многоэлементных фото-чувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС), погрешностей аналого-цифрового преобразования, наличия загрязнений на торце и элементах оптической системы. Перед использованием напряженности в (1) для вычисления профиля показателя преломления должно быть выполнено восстановление распределения поля излучения световода в плоскости торца $E(x)$ по измеренному распределению оптического поля $g(x)$. При этом измеренные данные подвергаются сглаживанию с использованием цифрового фильтра нижних частот для устранения влияния на интенсивность излучения возмущающих факторов. Фильтр Баттерворта обеспечивает равномерное сохранение полезных информационных составляющих в полосе пропускания за счет наиболее плоской амплитудно-частотной характеристики. Основное требование к эксплуатационным характеристикам фильтра – удовлетворение компромисса между подавлением шума и обеспечением требуемого разрешения в анализе сигнала с учетом различных типов анализируемых оптических волокон. Очень важно сохранить разрешение сглаженного профиля в заданных пределах, особенно вблизи острых границ профиля, которые имеют локальный спектр с заметным высокочастотным содержанием. В качестве критерия выбора частоты среза предлагается обеспечить в выходном сигнале 99% мощности входного. Относительная погрешность ε , между профилем на входе фильтра и сглаженным профилем получается из выражения

$$\varepsilon = \frac{\int_S |A_o - A_i| ds}{\int_S A_i ds}, \quad (2)$$

где A_i и A_o - нормированные амплитуды напряженности электрического поля на входе и выходе фильтра соответственно.

Выбор параметров цифрового фильтра Баттерворта (порядка, полосы частот пропускания и полосы отсечки, уровня подавления) напрямую связан с особенностями измеренного распределения амплитуды поля, которое в свою очередь зависит от типа анализируемого оптического волокна. Для использования предлагаемого метода обработки критичными являются профили с резкими (и часто многократными) изменениями показателя преломления, что является причиной наличия высокочастотных составляющих в спектре сигнала, измеренного в ближней зоне излучения оптического волокна. Такие профили характерны для ступенчатых волокон, многослойных волокон со сниженной дисперсией, а также для интегральных оптических волноводов.

Для профилей градиентного типа данная задача решается проще, ввиду плавного изменения ППП. Поэтому при проведении исследований в качестве тестового изменения показателя преломления необходимо выбрать сложный профиль W-типа с несколькими скачкообразными изменениями показателя преломления (рис.1).

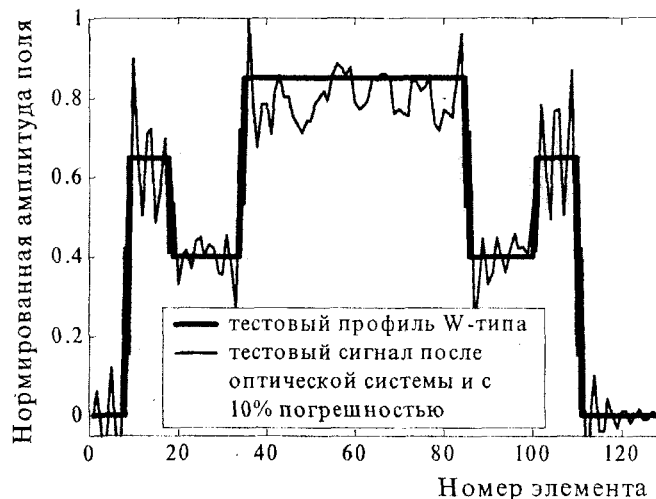


Рис. 1.

Основной задачей исследований является конструирование такого фильтра низких частот, который бы пропускал частоты, соответствующие резким изменениям профиля и в то же время подавлял высокочастотные уловые составляющие, вызванные процессом измерения. Эта задача содержит определенные противоречия ввиду скачкообразного изменения профиля, поэтому компромиссным является использование условия присутствия в отфильтрованном сигнале 99% мощности входного сигнала. Еще одна особенность связана с тем, что источником информации о профиле показателя преломления является распределение оптического излучения световода, прошедшее через оптическую систему. Данное преобразование описывается интегралом свертки с передаточной функцией оптической системы и приводит к появлению в сигнале, воспринимаемом фотоприемником, синусоидальных составляющих. Поэтому при выполнении моделирования в качестве исходного необходимо использовать сигнал, полученный сверткой W-профиля с передаточной характеристикой оптической системы. В-третьих, к тестовому сигналу необходимо добавить 10% случайный шум с равномерным распределением для имитации максимально допустимых погрешностей измерительной системы.

Результаты исследований. Выбор параметров фильтра производился в режиме интерактивного проектирования с помощью инструмента SPTool (Signal Processing Tools) MATLAB. В ходе исследований осуществлялось варьирование параметров фильтра: порядка N , полосы пропускания F_p , неравномерности в полосе пропускания R_p , нижней границы полосы подавления F_s и коэффициента затухания в полосе подавления R_s .

В ходе исследований установлено, что изменение порядка фильтра в диапазоне от 2 до 6 несущественно влияет на характер восстановленного сигнала. Дальнейшие исследования относительной погрешности ε (2) подтвердили вывод о достаточности использования фильтров 2-го...3-го порядков, как обеспечивающих высшую точность восстановления профиля. Влияние порядка фильтра и частоты отсечки на величину относительной погрешности ε при исследовании волокна W-типа прослеживается по рис.2. Уменьшение ошибки ε с ростом частоты отсечки понятно, т.к. включение высокочастотных составляющих в выходной сигнал фильтра приближает последний к нефильтрованному сигналу. Поэтому, как указывалось выше, следует находить определенный компромисс в выборе данной величины. Из рис.2 видно, что значение пространственной частоты отсечки для сильно зашумленных распределений должно выбираться в пределах $0,1/\Delta x$ [мкм⁻¹]. На рис.3 представлено совместное изображение исходного сигнала с 10% гауссовым шумом и отфильтрованное с помощью фильтра Баттерворта 3-го порядка при частоте отсечки $0,075/\Delta x$ [мкм⁻¹] распределение амплитуды поля.

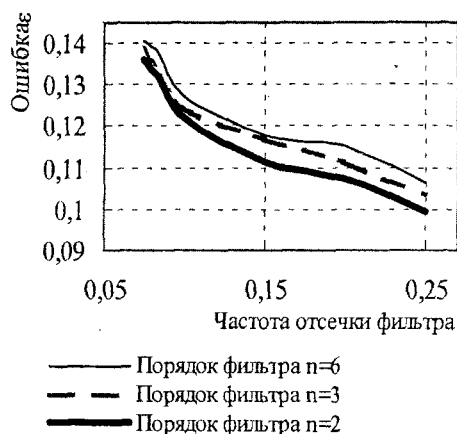


Рис. 2.



Рис. 3.

Видно, что значительный уровень шумов не позволяет получить ступенчатое изменение входного распределения. Исходя из того, что при контроле реальных волокон профиль показателя преломления априори неизвестен, достижение более ка-

чественных результатов маловероятно. Однако, на практике, в отличие от рассмотренных условий и искажений входных распределений, наблюдаются значительно меньшие погрешности измерений распределений оптических полей излучений световодов. Данное обстоятельство позволяет получить погрешности фильтрации реальных сигналов на порядок меньше, имевших место в случае имитационного моделирования и добиться восстановления профиля с высокой степенью приближения к реальному.

После выполнения фильтрации распределения оптического поля, соответствующего излучению световода, по выражению (1) рассчитывался профиль показателя преломления (рис.4). Видно, что требуется аппроксимация профиля, т.к. в расчетной формуле присутствует операция вычисления второй производной, которая при незначительных изменениях во входном распределении поля может привести к значительным скачкам профиля показателя преломления. Была исследована полиномиальная аппроксимация рассчитанного профиля в виде

$$y = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \dots + p_n x + p_{n+1}, \quad (3)$$

где p_n - коэффициенты полинома.

Сначала рассчитывались коэффициенты полинома с помощью функции Matlab Polyfit, а затем с использованием функции Polyval рассчитывались значения полинома по точкам и погрешность аппроксимации Δ . При исследованиях варьировалась степень полинома n . На рис.5-7 представлены графики профилей показателя преломления, рассчитанные по (1) и аппроксимированные полиномами степеней 8, 10 и 19. На рис.8 также приведены графики изменения абсолютной погрешности аппроксимации Δ в точках сечения профиля в зависимости от степени полинома.



Рис. 5.



Рис. 6.

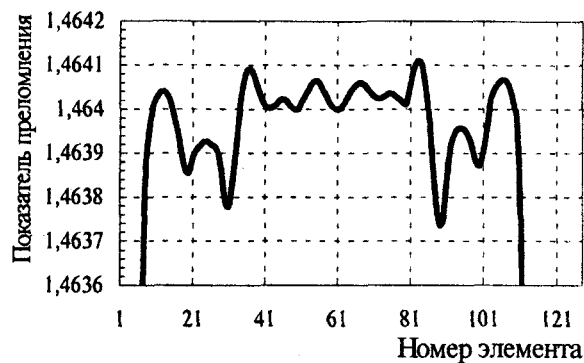


Рис. 7.

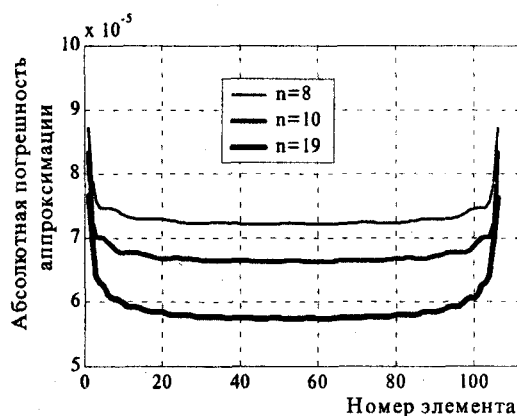


Рис. 8.

В ходе исследований установлено, что с учетом формы тестового распределения поля наилучшим образом профиль аппроксимируется полиномами 10-ой и 11-ой степеней. Полиномы со степенями ≤ 9 -ти, а также более 13-ой степени некачественно аппроксимируют среднюю часть профиля: первые ввиду недостаточного количества составляющих высших порядков, а вторые – из-за излишне подробного повторения изменений профиля, присутствующих в рассчитанном профиле из-за шумов во входном распределении оптического поля и операции двойного дифференцирования.

Как видно из результатов расчетов и моделирования погрешность оеделения профиля показателя преломления не превышает $9 \cdot 10^{-5}$ для граничных областей и в 1,5 раза меньше для центральных областей профиля, что составляет не более 10% относительно параметров профиля и подтверждает возможность использования предложенного метода обработки.

Выводы. В ходе исследований получены следующие новые научные результаты:

- получил дальнейшее развитие метод устранения влияния шумов измерений на идентификацию параметров излучений оптических волокон, характеризующийся использованием фильтров нижних частот Баттерворта;

- определены рекомендации по выбору порядка и частоты отсечки фильтра. Так использование фильтров порядков 3-5 не имеет существенных отличий. Поэтому с целью сокращения вычислительных операций и повышения быстродействия обработки рекомендуется использовать фильтр 3-го порядка. Выбор нормализованной частоты отсечки менее 0,2 пространственной частоты дискретизации распределения оптического поля ($\omega_{отс} < 0,2/\Delta x$ [мкм⁻¹]) полностью устраняет высокочастотные

шумы измерения, однако остаются периодические неоднородности, обусловленные действием объектива. Поэтому рекомендованным значением является величина нормализованной частоты отсечки фильтра в диапазоне $0,1 \dots 0,15$ пространственной частоты дискретизации ($\omega_{отс} = (0,1 \dots 0,15) / \Delta x$ [мкм⁻¹]). Снижение частоты отсечки ниже $0,1 / \Delta x$ [мкм⁻¹] приводит к значительному сглаживанию и потере полезной информации об изменениях профиля;

- исследованы особенности аппроксимации рассчитанных профилей полиномами различных степеней. Установлено, что для обеспечения ошибки аппроксимации не более 5% для плавно изменяющихся градиентных профилей должен выбираться полином 5-6-ой степени, а для ступенчатых профилей с резкими границами – 10-11-ой степени.

Практическая ценность результатов исследований состоит в формировании рекомендаций к параметрам операций обработки распределений излучений оптических волокон. Результаты исследований позволяют разработать алгоритмы и программы для технологического оборудования контроля профиля показателя преломления оптических волокон методом ближнего поля. Дальнейшие исследования предполагают применение предлагаемых методик к реальным полям излучений оптических волокон, измеренным на оборудовании, реализующем метод ближнего поля [3] и оценку их эффективности в условиях практического использования.

Литература

1. Филипенко А.И. Определение профиля показателя преломления световодов по измеренной интенсивности ближнего поля // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 131. С.155-159.

2. Filipenko A.I. , Nevludov I.Sh., Lebedev O.G. Fiber refractive index profile determination from measured near field intensity // Proceedings of LFNМ'2002. 4th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkiv, June, 3-5, 2002. P.345-348.

3. Невлюдов И.Ш., Филипенко А.И. Технологический контроль диаметра модового поля одномодовых оптических волокон // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.–1998.–№1.–С.22–24.