передаваемого по ним. Так установлено, что коэффициент затухания волокон может снижаться при увеличении передаваемой мощности.

Представляется важным не только учитывать различия коэффициентов релеевского рассеяния различных волокон, но и осуществлять сравнительные их измерения. Эту возможность реализует оптический рефлектометр, работающий на релеевском рассеянии.

Поскольку релеевское рассеяние является основной компонентой оптических потерь, то сравнение коэффициентов затухания волокон позволяет оценить отношение коэффициентов релеевского рассеяния. Его значение можно с достаточной степенью точности определить способом наименьших квадратов.

Если оптические волокна соединить разъемным соединением, то отношение коэффициентов релеевского рассеяния можно определить методом экстраполяции на рефлектограммы заданного участка волокна на пик отражения. При этом необходимо учитывать потери на отражение.

Более точные значения можно получить посредством анализа потерь на соединениях. Так при измерении потерь на соединении двух волокон в прямом направлении A' и в обратном направлении A'' отношение коэффициентов релеевского рассеяния определится k_{r1} / k_{r2} по формуле

$$k_{r1} / k_{r2} = 10^{(A'-A'')/20}. \qquad (1)$$

Рассмотренные методы показали удовлетворительные результаты при рефлектометрических измерениях на различных длинах волн. Измерение коэффициентов релеевского рассеяния волокон позволяет следить за динамикой изменения потерь при воздействии различных внешних факторов на оптические волокна.

1. Долгов И.И., Иванов Г.А. и др. Радиационно стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной.// Фотон-экспресс. 2005.-№6.- С. 4.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГИСТОГРАММ СТАТИСТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ В СИСТЕМАХ ЛАЗЕРНОЙ ХРОНОСКОПИИ СУБНАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Малевич И.А., Поляков А.В., Чубаров С.И.*

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
*БГПУ им. М.Танка, Минск, Беларусь

Для лазерных систем (ЛС) высокого временного разрешения предложен метод восстановления «истинных» гистограмм регистрируемых статистических распределений входных оптических полей в условиях «шумящей» шкалы ЛС. Решена задача восстановления гистограмм и аналитической оценки точности восстановления.

В задачах анализа световых потоков многоканальными лазерными системами нано- и пикосекундного разрешений возникает задача описания и компенсации влияния различного рода «внутренних» шумов аппаратуры (температурных и временных вариаций параметров источников излучения, шумов преобразователей временного масштаба, флуктуаций измерительных шкал, фотодетекторных каналов и др.) на регистрируемую гистограмму распределения. Такие проблемы весьма существенно влияют на эффективность оптических методов в задачах сверхдальней оптической локации, обнаружении следов объектов искусственного и естественного происхождения в различных средах, в оптоэлектронных вычислительных системах с быстродействующей памятью рециркуляционного типа и др.

Предложено решение обратной задачи восстановления гистограмм, регистрируемых лазерной системой (ЛС) в присутствии шумов на основе анализа статистических свойств флуктуаций информационных шкал лазерных систем. Рассматривается случай неполной априорной информации о регистрируемом распределении.

Предложена модель искажения регистрируемого распределения из-за «внутренних» шумов лазерной системы. Рассматривается регистрация в ЛС распределения случайной величины на фиксированном интервале от $-T/2$ до $T/2$. Данный интервал отображается в многоканальной ЛС в виде ряда из η дискретных каналов. Соответственно, ширина одного канала $\Delta = T/\eta$. Из-за присутствия в ЛС целого спектра приборных шумов, измеряемая величина подвергается воздействию случайной аддитивной некоррелированной помехи ξ с плотностью вероятностей $W(\xi)$.Флуктуации границ каналов в многоканальной ЛС η предполагаем независимыми с нулевым средним и ограниченными, т.е. $\max|\eta|$.

Плотность распределения η обозначим $p(\eta)$. Подобная модель флуктуаций границ каналов соответствует ЛС, в которых для стабилизации временной шкалы применяется метод фазовой СВЧ синхронизации, аналого-цифровой стабилизации и ФАПЧ.

Считаем, что $W(y)$ – плотность распределения измеряемой величины после выполнения над ней в ЛС ряда преобразований. В силу аддитивности помехи, плотность $W(y)$связана с плотностью распределения входной величины $\varphi(\mathrm{x})$ следующим соотношением:

$$W(y) = \int_{-\infty}^{\infty} W(y-x)\varphi(x)\mathrm{dx} \qquad (1)$$

Вероятность попадания величины yв i-й канал системы равна

$$g_i = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}\eta_1 \int_{-\infty}^{\infty} p(\eta_1)p(\eta_2)\mathrm{d}\eta_2 \int_{(i-1)\Delta+\eta_1}^{i\Delta+\eta_2} W(y)\mathrm{dy} \qquad (2)$$

Здесь η_1 и η_2 – величины флуктуаций первой и второй границ i-го канала. Учитывая, что величины η_1 и η_2 независимы, связь плотности распределения с плотностью распределения входной величины x имеет вид:

$$f(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(s-y) \int_{-\infty}^{\infty} W(s-\tau)\varphi(\tau)\mathrm{d}\tau\mathrm{d}s = \int_{-\infty}^{\infty} \kappa(\tau-y)\varphi(\tau)\mathrm{d}\tau\,, \qquad (3)$$

где

$$\kappa(\tau-y) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(s-y)W(s-\tau)\mathrm{d}s\,. \qquad (4)$$

Функция $\kappa(\tau-y)$ зависит только от свойств шумов ЛС. Она определяет характер искажения регистрируемой плотности распределения.

Как видно, измеряемая функция $f(y)$ представляет собой результат действия на исходную функцию $\varphi(x)$ интегрального оператора с ядром $\kappa(\tau-y)$. При этом задача восстановления функции плотности распределения в конечных точках, т.е. построения гистограммы функции $\varphi(x)$, сводится к решению системы алгебраических уравнений. С учетом вероятности попадания величины у в i-й канал ЛС

$$g_i = \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f\left(y\right)\mathrm{d}y = \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \int_{-T/2}^{T/2} \kappa\left(\tau - y\right)\varphi\left(\tau\right)\mathrm{d}\tau\mathrm{d}y. \tag{5}$$

С учетом

$$\int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} f\left(y\right)\mathrm{d}y = \sum_{j=1}^{n} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} \varphi(\tau) \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \kappa(\tau - y)\mathrm{d}y\mathrm{d}\tau,$$

где

$$f_i = \sum_{j=1}^{n} \varphi_i \kappa_{ji}, \tag{6}$$

f_i –значение функции $f(y)$ в некоторой точке на интервале $\left[(i-1)\Delta; i\Delta\right]$; φ_j – значение функции $\varphi(x)$ в некоторой точке на интервале $\left[(j-1)\Delta; j\Delta\right]$; κ_{ji} – матрица, определяемая выражением

$$\kappa_{ji} = \frac{1}{\Delta} \int_{(j-1)\Delta}^{j\Delta} \int_{(i-1)\Delta}^{i\Delta} \kappa(\tau - y)\mathrm{d}y\mathrm{d}\tau. \tag{7}$$

В случае, когда вектор $\overline{f}$ и матрица κ_{ji} в (6) известны точно, вектор $\overline{\varphi}$, который является решением системы уравнений, является восстановленной гистограммой распределения $\varphi(x)$.

Однако, в практике ЛС сверхвысокого разрешения и вектор $\overline{f}$ и матрица κ_{ji} известны с некоторой конечной точностью. В этих условиях возникает задача определения не только восстановленного вектора $\overline{\varphi}$, но и точности его восстановления при известной точности исходных данных.

Рассмотрена система уравнений, в которой к вектору $\overline{f}$ добавлен случайный вектор ошибок $\overline{\xi}$, а к матрице κ – случайная матрица погрешностей ζ, при этом к вектору $\overline{\varphi}$ прибавляется вектор ошибок $\overline{\delta}$:

$$f_i + \xi_i = \sum_{j=1}^{n} \left(\kappa_{ji} + \zeta_{ji}\right)\left(\varphi_j + \delta_j\right), \quad i = \overline{1, n} \tag{8}$$

В этой системе уравнений величины $\overline{f}$, κ и $\overline{\varphi}$ соответствуют точной системе уравнений (6), а величины $\overline{\xi}$, ζ и $\overline{\delta}$ являются случайными и равенство (8) определяет связь между ними. Принимая во внимание (6), из (8) получим

$$\overline{\xi} = \overline{\varphi}\zeta + \overline{\delta}\kappa + \overline{\delta}\zeta. \tag{9}$$

Считаем, что ζ и $\overline{\delta}$ малы по отношению к соответствующим компонентам матрицы κ и вектора $\overline{\varphi}$. Тогда для вектора $\overline{\delta}$ справедливо равенство:

$$\overline{\delta} = \overline{\xi}\kappa^{-1} - \overline{\varphi}\mu\zeta\kappa^{-1}. \tag{10}$$

Правая часть выражения (10) состоит из двух статистически независимых слагаемых, поэтому дисперсии компонент вектора $\overline{\delta}$ будут равны сумме дисперсии $D\delta_i'$ вектора $\overline{\xi}\kappa^{-1}$ и дисперсии $D\delta_i''$ вектора $\overline{\varphi}\zeta\kappa^{-1}$. Это обстоятельство даёт возможность рассмотреть влияние на ошибку восстановленного каждого фактора ζ и $\overline{\xi}$ в отдельности, а результирующую дисперсию ошибки восстановления по совокупности всех испытаний представить как $D\delta_i = D\delta_i' + D\delta_i''$. Оценено влияние вектора $\overline{\xi}$, считая, что матрица κ определена точно, т.е. $\zeta_{ji} = 0$. Это условие преобразовывает выражение (10) к виду

$$\overline{\delta} = \overline{\delta'} = \overline{\xi}\kappa^{-1}. \qquad (11)$$

Компоненты случайного вектора $\overline{\xi}i\{\xi i\}$ определяют отклонения относительной частоты попадания случайной величины в i-й канал ЛС $h_i^{N_0} = {m_i}/{N_0}$ (m_i– число величин, попавших в i-й канал, N_0 – общее число испытаний) от соответствующей вероятности $f_i\Delta$ или, для плотности распределения, отклонения величины $\mathrm{H}_i = {h_i^{N_0}}/{\Delta}$ от величины $\overline{\varphi}$, что позволяет считать:

$$\mathrm{H}_i = \varphi_i + \xi_i. \qquad (12)$$

Компоненты вектора $\overline{\mathrm{H}}$ измеряются непосредственно в ЛС, методом электронного «бенимаркинга» на основе синтеза эталонных оптических воздействий на входе ЛС и определение их деформаций за счет шумов в системе. Следовательно, задачу восстановления гистограммы входного распределения можно рассматривать в виде статистической оценки вектора $\overline{\vartheta}$ при известном векторе $\overline{\mathrm{H}}$.Для решения этой задачи необходимо знать распределение вектора $\overline{\xi}$. Вид функции плотности распределения вектора $\overline{\xi}$ зависит от типа ЛС. Одноканальная ЛС имеет один кассовый интервал, который принимает последовательно nфиксированных положений во всем диапазоне измерения от $-{T}/{2}$ до ${T}/{2}$. Для i-го положения канала производится N_0испытаний, по которым определяется H_iДля получения гистограммы распределения производится nN_0испытаний. В многоканальной ЛС все поступившие на вход события регистрируются, т.е. при каждом испытании измеряемая величина попадает в один из n каналов (случай ЛС с памятью, без учета мертвого времени).

Таким образом, полученные соотношения позволяют по известным статистическим характеристикам ЛС восстанавливать гистограммы входных распределений оптических полей и рассчитывать ошибки восстановления.

АНАЛИЗ ФОКУСИРУЮЩИХ СВОЙСТВ АКСИКОНОПОДОБНЫХ СТРУКТУР

Савельев Д.А., Устинов А.В.*, Хонина С.Н.*

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (НИУ), Самара, Россия

*Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

Проведены исследования фокусирующих свойств аксиконоподобных структур с высокой числовой апертурой в ближней зоне дифракции при линейной поляризации падающего излучения. Моделирование выполнялось при помощи интегрального метода, основанного на разложении по плоским волнам.

Хорошо известно, что аксикон формирует бесселевый пучок нулевого порядка, диаметр центрального пятна которого по полуспаду интенсивности равен[1]:

$$FWHM = 0{,}36\lambda/NA, \qquad (1)$$