

УДК 681.7.068
ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ИНФОРМАТИВНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МУТНОМЕТРИИ

А. П. МАРКОВ, С. С. СЕРГЕЕВ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

Преимущества оптоволоконных преобразований в структурах оптико-электронных мутнометров в большей мере проявляются в спектрально-энергетических взаимодействиях неоднородностей с лучистым потоком Φ_λ .

Лучистый поток, как носитель первичной информации, характеризуется абсолютным значением (амплитудой, интенсивностью) и спектрально-энергетическим распределением.

В общем случае абсолютное значение лучистого потока Φ_λ определяется эффектом суммарного воздействия на среду и может быть представлено выражением:

$$\Phi_\lambda = F \cdot \int_0^\infty b_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot d\lambda, \quad (1)$$

где F – эффективный коэффициент использования отображаемого средой лучистого потока; b_λ – плотность энергии отображаемого средой излучения; τ_λ – коэффициент спектрального преобразования излучения при взаимодействии со средой.

Из выражения (1) следует, что для определения Φ_e в зависимости от принятого информативного параметра неоднородной среды необходимо вычислить интеграл:

$$\Phi_e = \int_0^\infty b_\lambda \cdot \tau_{i\lambda} \cdot d\lambda. \quad (2)$$

При этом неопределенность в функциональной зависимости b_λ и $\tau_{i\lambda}$ ограничивает возможность установления определенной связи между эффективным потоком Φ_e и физико-техническим состоянием неоднородной среды. Однако с учетом специфики неоднородностей и их спектрально-энергетического взаимодействия с излучением устанавливаются приближенные аналитические зависимости Φ_e для различных по природе и геометрии неоднородностей в ограниченных диапазонах спектра и для каждого τ_λ .

Для некоторой эффективной длины волны $\lambda_{эф}$ отражаемое средой излучение более достоверно отображает состояние и свойства как неоднородностей, так и неоднородной среды. Именно в параметрах информативного излучения и спектральном распределении лучистого потока сосредото-

тачивается первичная информация. Тогда в сравнении экстремальных значений лучистых потоков $\Phi_{эф}$ и $\Phi_{он}$ (опорный поток с минимальными значениями параметров) для ограниченного участка спектра более эффективно реализуется информационно-преобразовательный процесс.

В процессе трансформации информативного излучения от неоднородной среды до получения выходного сигнала сказывается дестабилизирующее влияние ряда технологических, физических, схемных внутренних и внешних факторов по каждой операции и каждым функциональным элементом структуры мутномеров. При этом определяющей является методическая погрешность формирования информативного излучения.

В качестве основных признаков мутности среды и источников информации о ее пространственно-временных изменениях выступают диффузно-рассеивающие неоднородности. Объемное распределение таких источников определяется некоторой постоянной скоростью и ориентировано относительно визирной оси. При этом начало отсчета времени совпадает с моментом прохождения неоднородности через визирную ось оптического волокна системы трансформации излучения.

При попадании элементарной неоднородности в поле зрения оптического приемника формируется оптический сигнал (импульс), значение которого $\Delta\Phi(t)$ определяется выражением:

$$\Delta\Phi(t) = \begin{cases} \frac{E}{\pi} \cdot \Delta S_i \cdot \frac{S_0}{l^2} \cdot e^{-\int_0^t \alpha_i dl} & \text{при } 0 < t < t_i \\ 0 & \text{при } t < 0 \text{ и } t > t_i \end{cases} \quad (3)$$

Применительно к неоднородной среде длительность такого импульса определяется выражением:

$$t_i = \frac{l \cdot b_1}{f \cdot \mathcal{Q}_i}, \quad (4)$$

где f – фокусное расстояние; b_1 – линейный размер отверстия приемного световода; $\mathcal{Q}_i$ – скорость i -ой частицы.

Вероятность обнаружения неоднородности в поле зрения объема V за время t описывается по закону Пуассона:

$$p_n(t) = e^{-\bar{n}} \cdot \frac{(\bar{n})^n}{n!}, \quad (5)$$

где $\bar{n} = n_0 \cdot V \cdot t$ – математическое ожидание числа неоднородностей; n_0 – их среднее число, появившееся за единицу времени t в единице объема V .

Математическое ожидание проявления информативного сигнала (светового) от неоднородностей, появившихся в элементарном объеме dV поля зрения оптической системы, определяется выражением:

$$d\bar{\Phi} = n_0 \cdot \frac{E \cdot \Delta\bar{S}_i}{\pi} \cdot \frac{S_0 \cdot b_1}{l \cdot f \cdot \Delta\mathcal{G}_i} \cdot e^{-\int_0^l \alpha dl} \cdot dV, \quad (6)$$

где $\Delta\bar{S}_i$, $\Delta\mathcal{G}_i$ – математическое ожидание сечений и скоростей частиц в элементарном объеме; $\Delta V = \frac{S_1 \cdot l}{f} \cdot dl$ – элементарный объем поля зрения оптического приемника; S_1 – площадь освещенной части входного торца приемного световода.

Для случая, когда торец световода воспринимает информативное излучение, вся площадь световода освещена $S_1 = a_1 \cdot b_1$. Тогда элементарный информативный поток $d\Phi_i$ будет представлен выражением:

$$d\bar{\Phi}_i = n_0 \cdot \frac{E}{\pi} \cdot \Delta\bar{S}_i \cdot S_0 \cdot \frac{a_1 \cdot b_1^2}{f^2 \cdot \Delta\mathcal{G}_i} \cdot e^{-\int_0^{l_1} k \cdot dl} \cdot dl. \quad (7)$$

При $k = \text{const}$, просуммировав элементарный поток $\Delta\bar{\Phi}_i$ в пределах от l_0 до l_1 получим:

$$\Delta\bar{\Phi}_i = n_0 \cdot \frac{E}{\pi} \cdot \Delta\bar{S}_i \cdot S_0 \cdot \frac{a_1 \cdot b_1^2}{f^2 \cdot \Delta\mathcal{G}_i \cdot \alpha} \cdot (e^{-\alpha \cdot l_0} - e^{-\alpha \cdot l_1}). \quad (8)$$

В такой модели информативный поток от неоднородностей, появившихся в поле зрения приемного световода, учитывает концентрацию и структуру этих частиц, их освещенность, форму и размеры, площадь освещенной части торца приемного световода, фокусное расстояние, скорость движения частиц, коэффициент поглощения среды. Все эти факторы специфически воздействуют на информативный сигнал и не имеют корреляционных связей. Для независимых величин результирующее воздействие определяется суммой средних квадратических отклонений отдельных параметров волоконно-оптического преобразователя.

Предельная погрешность Δ_{np} и средняя квадратическая σ определяются законом распределения этих погрешностей. Для нормального закона распределения принято $\Delta_{np} = 3 \cdot \sigma$. Тогда значение σ_{np} рассчитывается по следующей зависимости:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\left(\frac{\partial\bar{\Phi}}{\partial E}\right)^2 \cdot \sigma_E^2 + \left(\frac{\partial\bar{\Phi}}{\partial f}\right)^2 \cdot \sigma_f^2 + \left(\frac{\partial\bar{\Phi}}{\partial S_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial\bar{\Phi}}{\partial T}\right)_{T=20}^2 \cdot \sigma_T^2}. \quad (9)$$

Приняв в качестве источника излучения светодиод, имеем нестабильность мощности излучателя 0,3 % на 10° К. Нестабильность площади освещения торца приемного световода зависит как от источника питания, так и от формы неоднородностей, состояния поверхности торца световода, эффективной его площади (с учетом обломанных световодов $\approx 0,5$ %).

Важное значение в метрологической оценке трансформации излучений имеет дифференцированный учет влияния по составляющим методической погрешности. Такой учет производится по частным производным дестабилизирующих факторов каждого параметра.

Для определения характера влияния ориентации световодного излучателя на выходной сигнал оптико-электронного преобразователя продифференцируем выражение (8) по параметру f с учетом того, что при этом величина фототока равна:

$$I_{\phi n} = \frac{1}{\pi} \cdot P_{uu} \cdot K_c \cdot S_{\phi n} \cdot n_0 \cdot \Delta \bar{S}_i \cdot S_0 \cdot \frac{S_1 \cdot b_1}{f^2 \cdot \bar{g}_i \cdot \lambda} \cdot (e^{-\alpha \cdot l_0} - e^{-\alpha \cdot l_1}), \quad (10)$$

где P_{uu} – мощность излучения излучателя при номинальном токе; K_c – коэффициент потерь мощности оптического излучения в световоде; $S_{\phi n}$ – интегральная чувствительность фотоприемника.

Преобразовав выражение (10), получим:

$$\frac{\partial I_{\phi n}}{\partial f} = \frac{1}{\pi} \cdot P_{uu} \cdot K_c \cdot S_{\phi n} \cdot n_0 \cdot \Delta \bar{S}_i \cdot \frac{2S_1 \cdot b_1}{f^3 \cdot \bar{g}_i \cdot \lambda} \cdot (e^{-\lambda \cdot l_0} - e^{-\lambda \cdot l_1}), \quad (11)$$

или в приближении будем иметь:

$$\frac{\partial I_{\phi n}}{\partial f} = \frac{\bar{\Phi}_u}{f}. \quad (12)$$

Из этого выражения следует, что чем больше фокусное расстояние приемника, тем меньше влияние разброса отклонений в фиксированном положении объектива оптической системы.

Для оценки влияния технологических погрешностей изготовления входного торца приемного световода и согласования других элементов продифференцируем выражение (10) по площади S_1 . Тогда получим:

$$\frac{\partial I_{\phi n}}{\partial S_1} = \frac{1}{\pi} \cdot P_{uu} \cdot K_c \cdot S_{\phi n} \cdot n_0 \cdot \Delta \bar{S}_i \cdot \frac{S_0 \cdot b_1}{f^2 \cdot \bar{g}_i \cdot \lambda} \cdot (e^{-\lambda \cdot l_0} - e^{-\lambda \cdot l_1}). \quad (13)$$

В целом на метрологию оптико-волоконного преобразования существенное влияние оказывают: юстировка объектива (разброс фокусного расстояния), погрешности формирования входного торца световода, колебания температуры и нестабильность источника излучения.