

3. Павлов П. А. Анализ алгоритмов измерений лазерным динамическим гониометром // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 17—20; Pavlov P. A. Laser dynamic goniometer measurement algorithms // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 1. P. 22—27.

4. Павлов П. А. О способе уменьшения систематической погрешности определения направления интерференционным нуль-индикатором // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Приборостроение и информационно-измерительные системы. 2006. С. 34—37.

5. Бачиш Е. А., Павлов П. А. Исследование метрологических характеристик лазерного динамического гониометра // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 19—23; Bachish E. A., Pavlov P. A. Laser dynamic goniometer metrological characteristics // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 5. P. 465—471.

6. Sim P. J. Modern Techniques in Metrology // World Scientific. Singapore, 1984. P. 102—121.

7. ГОСТ 2875—88. Меры плоского угла призматические.

8. Бурнашев М. Н. и др. Лазерные системы динамической аттестации угловых преобразователей различного типа // Изв. ГЭТУ. 1997. Вып. 509. С. 36—40.

9. Бурнашев М. Н. и др. Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 2. С. 141—146.

10. Кривцов Е. П., Филатов Ю. В. Исследование погрешности воспроизведения единицы плоского угла кольцевым лазером // Измерительная техника. 1989. № 12. С. 11—12; Krivtsov E. P., Filatov Yu. V. Errors in reproducing the planar angle unit with a ring laser // Measurement Techniques. 1989. V. 32. N 12. P. 1140—1142.

11. Баринаева Е. А. Разработка и исследование методов повышения точности гониометрических систем: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / СПб., 2009.

12. Баринаева Е. А., Иващенко Е. М., Павлов П. А. Кольцевой лазер в прецизионных угловых измерениях // Лазеры. Измерения. Информация 2011: Сборник докл. 21-й Междунар. конф. 2011. Т. 1. С. 62—75.

13. Феликс Л. и др. Справочник студента по математике. М.: Высшая школа, 2011.

Дата принятия 15.05.2012 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

389.6:681.2.082.083

Метод калибровки средств измерений параметров качества лазерного пучка

К. Ш. АБДРАХМАНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: tiratron@vniiofi.ru

Описан метод калибровки средств измерений пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения.

Ключевые слова: энергия, диаметр, расходимость и коэффициенты распространения пучка.

The method of measuring instruments calibration for spatial-power characteristics of laser radiation measurements is described.

Key words: energy, beam diameter, beam divergence and propagation ratios.

В последнее десятилетие наблюдается серьезный прогресс в разработке, выпуске и продаже импульсных твердотельных лазеров и систем на их основе. К числу основных физических величин и параметров, по которым сертифицируются импульсные лазеры, относятся энергия, длительность импульса, длина волны, совокупность параметров, характеризующих качество пучка — распределение плотности энергии (РПЭ), угол расходимости, ширина, параметр M^2 и др. По мере совершенствования импульсной лазерной техники, расширения динамического, временного и спектрального диапазонов измерения энергии, параметров качества пучка, длительности импульса и длины волны излучения увеличились номенклатура и количество выпускаемых десятками зарубежных фирм лазерных джоульметров и других средств измерений (СИ) указанных выше величин.

В России и за рубежом создан соответствующий парк рабочих и первичных эталонов, рабочих СИ в области лазер-

ной радиометрии, а также разработаны и введены в обращение международные стандарты на терминологию и методы выполнения измерений параметров лазерных пучков. Так, в соответствии с [1] изготовитель должен указать в документации на лазерную систему 15 характеристик лазерного излучения, 7 из которых являются пространственными. Следует отметить, что в составе СИ параметров качества пучка все чаще присутствуют ПЗС-системы, от метрологических характеристик которых зависит точность определения основных параметров излучения. Поэтому во ФГУП «ВНИИОФИ» был разработан метод калибровки СИ пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения (СИПЭХ). Данный метод можно применять при калибровке указанных СИ, работающих в диапазоне длин волн 0,3 — 2,0 мкм. Определение метрологических характеристик проводится на государственном первичном эталоне (ГПЭ) единиц энергии, распределения плотности энергии,

длительности импульса и длины волны лазерного излучения.

Подготовка к калибровке начинается с юстировки оптического тракта эталона, для чего используют вспомогательные лазеры (чаще всего гелий-неоновые с длиной волны 0,6328 мкм). Апертура оптической системы должна охватывать сечение пучка так, чтобы его отсекаемая часть по мощности (энергии) не превышала 1 % суммарного измеряемого значения. Ослабители и формирующие оптические элементы монтируют таким образом, чтобы оптическая ось проходила через их центры. Во избежание появления систематических погрешностей необходимо предельно минимизировать влияние отражений, интерференционных эффектов, внешних засветок, тепловых и конвективных воздушных потоков.

Калибровку СИПЭХ осуществляют с помощью эталонного первичного измерительного преобразователя (ЭПИП) калориметрического типа с калиброванной диафрагмой на входе путем подачи на вход двумерной матрицы лазерного излучения, имеющего в поперечном сечении равномерное РПЭ. Данный метод позволяет определить значения коэффициентов преобразования калибруемого матричного СИПЭХ на длинах волн 0,532 и 1,064 мкм и основной относительной погрешности.

Определение коэффициентов преобразования измерительных каналов калибруемого матричного СИПЭХ в зависимости от выбранной оператором длины волны проводят по схеме, приведенной на рисунке, в следующей последовательности.

Для каждого из двух ослабителей выполняют подачу на СИПЭХ пяти импульсов ($j = 1—5$) излучения, имеющего равномерное распределение по сечению пучка, и их регистрацию по 256 макроканалам, созданным программно. Коэффициенты преобразования 256 измерительных каналов находят по формуле

$$\alpha_{i,j} = U_{i,j} / (k_d Q_j),$$

где $U_{i,j}$ — сигнал единичного измерения (одного импульса) для i -го измерительного канала; k_d — коэффициент деления оптического тракта ГПЭ; Q_j — энергия, подаваемая на вход СИПЭХ.

По значениям $\alpha_{i,j}$ определяют средние значения коэффициентов преобразования всех 256 измерительных макроканалов при работе с ослабителями № 1, 2

$$\bar{\alpha}_i^{1,2} = \sum_{j=1}^5 \alpha_{i,j}^{1,2}.$$

Вычисляют средние значения коэффициентов для всего динамического диапазона работы СИПЭХ

$$\bar{\alpha}_i = (\alpha_{i,j}^1 + \alpha_{i,j}^2) / 2.$$

Затем 256 значений $\bar{\alpha}_i$ нормируют на максимальное значение и заносят в компьютер для дальнейшей обработки.

Основная относительная погрешность. Исходя из анализа работы матричного СИПЭХ значение основной относительной погрешности при измерении РПЭ определяется как [2]:

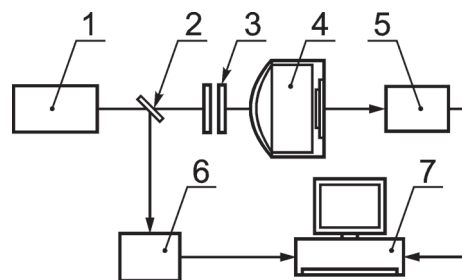


Схема определения коэффициентов преобразования СИПЭХ:

1 — импульсный лазер; 2 — светоделительная пластинка; 3 — набор ослабителей; 4 — фотометрический цилиндр; 5 — калибруемое матричное СИПЭХ; 6 — СИ энергии импульсного лазерного излучения СИЭП-1; 7 — компьютер

$$\Delta_{\text{СИПЭХ}} = 2 \sqrt{\sum_i \sigma_i^2 + \frac{1}{3} \sum_j \theta_j^2},$$

где σ_i — среднее квадратическое отклонение (СКО) i -й случайной составляющей погрешности; θ_j — границы интервала j -й погрешности, учитываемой как неисключенная систематическая погрешность (НСП);

$$\sum_i \sigma_i^2 = \sigma_Q^2 + \sigma_{\bar{\alpha}_i}^2 + \sigma_{\text{вз}}^2 + \sigma_{\text{ГПЭ}}^2;$$

$$\sum_j \theta_j^2 = \theta_Q^2 + \theta_v^2 + \theta_\tau^2 + \theta_T^2 + \theta_{\text{вз}}^2 + \theta_{\text{ГПЭ}}^2.$$

В эти формулы входят СКО результатов измерений энергии при помощи СИЭП-1 (см. рисунок), средних значений коэффициентов преобразования, коэффициентов взаимовлияния измерительных каналов — соответственно σ_Q , $\sigma_{\bar{\alpha}_i}$, $\sigma_{\text{вз}}$; СКО погрешности передачи единицы РПЭ эталона — $\sigma_{\text{ГПЭ}}$; НСП, обусловленные зависимостью коэффициентов преобразования матричного первичного измерительного преобразователя СИПЭХ от уровня измеряемой энергии и изменением температуры окружающей среды в пределах нормальных условий эксплуатации, — соответственно θ_Q , θ_v ; НСП основной погрешности, связанные с изменением длительности входного лазерного импульса и взаимовлиянием измерительных каналов, — соответственно θ_τ , $\theta_{\text{вз}}$; НСП комплекса СИ передачи единицы РПЭ эталона и основной погрешности аналого-цифрового преобразователя СИПЭХ — соответственно $\theta_{\text{ГПЭ}}$, θ_v . При этом $\sigma_{\text{ГПЭ}}$, $\theta_{\text{ГПЭ}}$, $\theta_T \leq 0,5 \%$.

Результаты определения $\sigma_{\bar{\alpha}_i}$ по каждому измерительному макроканалу в соответствии с алгоритмом заносят в таблицу, откуда для определения действительного значения этого СКО выбирают его наибольшее значение:

$$\sigma_{\bar{\alpha}_i} = 100 \frac{1}{\bar{\alpha}_i} \sqrt{\sum_{n=1}^5 (\bar{\alpha}_i - \alpha_i)^2 / (n(n-1))},$$

где $n = 5$ (число измерений).

Значение σ_Q вычисляют по формуле

$$\sigma_Q = 100 \frac{1}{\bar{Q}} \sqrt{\sum_{n=1}^5 (Q_j - \bar{Q})^2 / (n(n-1))}.$$

Здесь $Q_j, \bar{Q}$ определены для уровней энергии, полученных с применением ослабителей № 1, 2. В качестве σ_Q принимают наибольшее значение, найденное при работе с обоими ослабителями.

Значение θ_Q рассчитывают как

$$\theta_Q = \left| \left(\bar{\alpha}_i^1 - \bar{\alpha}_i^2 \right) / \left(2\bar{\alpha}_i \right) \right| 100.$$

Заметим, что $\sigma_{вз}, \theta_v, \theta_t, \theta_{вз}$ определяют экспериментально для конкретного типа СИПЭХ.

Таким образом, был проведен анализ основных составляющих погрешности при метрологической аттестации СИПЭХ с помощью равномерного поля распределения энергии излучения. Применение в оптической схеме гомогенизатора, обеспечивающего формирование равномерного калибровочного сигнала для всей приемной поверхности матрицы, по-

зволяет достичь необходимого уровня точности измерений, достаточной эффективности проведения аттестационных работ, а также рационального использования ресурса работы импульсного лазера, используемого при калибровке.

Л и т е р а т у р а

1. **ИСО 11252—2004.** Лазеры и относящиеся к лазерам оборудование. Лазерные устройства. Требования к документации.

2. **Улановский М. В.** Высокоточные измерения пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения с помощью фотоэлектрических матричных преобразователей: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 1989.

Дата принятия 01.03.2012 г.

528.8.535.243:53.089.5

Оптимизация и варианты реализации метода комбинированной параметрической спектроскопии при исследовании атмосферы

Х. Г. АСАДОВ, Л. Ш. ГОДЖАЕВА

Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджан, e-mail: asadzade@rambler.ru

Предложен метод комбинированной спектроскопии. Сформулирована и доказана базовая теорема, показывающая экстремальный характер спектрального сигнала, вырабатываемого на выходе дистанционных зондирующих устройств, в которых реализован метод. Рассмотрены варианты применения предлагаемого метода в атмосферной спектроскопии.

Ключевые слова: спектроскопия, дистанционное зондирование, атмосфера.

The method of combined spectroscopy is suggested. The basic theorem showing the extremal character of spectral signal produced at the output of remote sensing devices is formulated and proved. The variants of suggested method usage in atmospheric spectroscopy are considered.

Key words: spectroscopy, remote sensing, atmosphere.

Общеизвестна важная роль спектроскопии в дистанционном зондировании при атмосферных исследованиях. В зависимости от типа системы или прибора зондирования используются спектры отражения, поглощения, эмиссии, в частности люминесценции, и др. Одна из особенностей техники и сигналов атмосферной спектроскопии заключается в почти постоянном присутствии эффекта фильтрации высокочастотных составляющих спектра из-за инерционности как среды распространения сигналов, так и приемной аппаратуры. В основном по этой причине был разработан и успешно реализован метод производной спектроскопии, позволяющий четко различать мелкие детали в исследуемом спектре. Ниже предлагается метод комбинированной пара-

метрической атмосферной спектроскопии, который базируется на использовании в спектральном анализе взвешенной суммы основного спектра и ее производных.

Далее будем рассматривать только функционалы вида

$$F_k(\lambda, p_1, p_2) = \alpha_1 F(\lambda, p_1, p_2) + \alpha_2 F'_p(\lambda, p_1, p_2), \quad (1)$$

где a_i ($i = 1, 2$) — весовые коэффициенты; p_j ($j = 1, 2$) — параметры преобразования; λ — длина волны; $F'_p(\lambda, p_1, p_2) = dF(\lambda, p_1, p_2)/dp_1$.

Докажем базовую теорему смешанной параметрической спектроскопии.