

07;12

## **Статический многощелевой дисперсионный оптический спектрометр, основанный на комплементарных последовательностях Голя**

© А.В. Кузнецов, Е.Ф. Мартынович

Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, Иркутск

E-mail: filial@ilph.irk.ru

Иркутский государственный университет

Поступило в Редакцию 2 октября 2007 г.

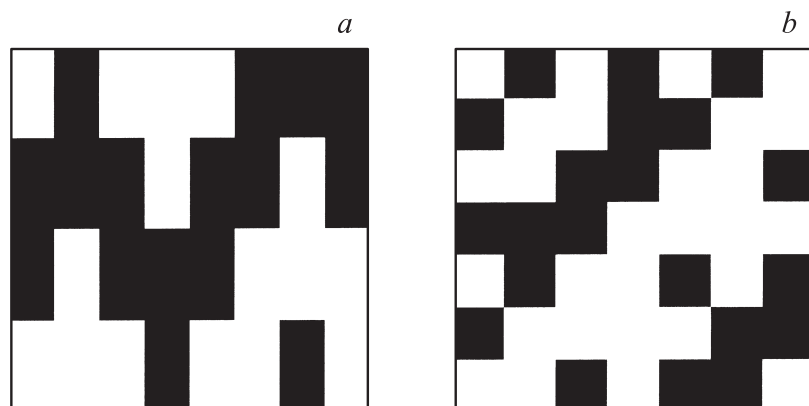
Представлен светосильный многощелевой спектрометр без движущихся элементов, основными частями которого являются многощелевая входная апертура, коллиматор, диспергирующий элемент, объектив, многоканальный детектор матричной структуры, ЭВМ и устройство вывода спектра. Данный спектрометр отличается от известных аналогов тем, что его работа основана на применении комплементарных последовательностей Голя (Golay). Благодаря этому многощелевая входная апертура данного спектрометра относительно проста, так как имеет всего четыре параллельных ряда щелей при как угодно большой длине данных рядов. В частности, на практике это позволяет сократить потери излучения на разделительных непрозрачных полосах между данными рядами щелей и упростить изготовление спектрометра.

PACS: 07.57.Ty, 07.60.Rd

Один из недостатков традиционных дисперсионных оптических спектрометров заключается в том, что их входная щель значительно ограничивает исследуемый поток излучения в случае протяженных источников, когда невозможно сфокусировать все излучение на входной

щели. Выходная щель также ограничивает поток излучения. В случае излучений низкой интенсивности это может приводить к необходимости уширения данных щелей, что влечет снижение спектральной разрешающей способности. Для повышения отношения сигнал/шум без снижения разрешающей способности и без существенного усложнения конструкции спектрометра разработаны многощелевые дисперсионные оптические спектрометры, имеющие системы многих щелей в плоских непрозрачных экранах (известные как многощелевые апертуры, кодовые апертуры, растры) вместо традиционных одинарных входных и выходных щелей. Первые работы в данной области относятся к середине XX века [1–3]. Распространению многощелевых спектрометров до последнего времени препятствовали относительно высокие требования к уровню оптических aberrаций в схемах данных спектрометров и сложности, связанные с наличием подвижных частей [4]. Современный уровень техники сделал возможным качественное развитие данной области. Благодаря современной доступности ЭВМ и многоканальных детекторов матричной структуры (например, ПЗС-матриц) в последнее время появились многощелевые спектрометры без выходной апертуры [5–7]. Такие спектрометры имеют несколько преимуществ: отсутствие движущихся частей, мультиплексность, большая светосила и возможность уменьшения влияния некоторых оптических aberrаций на программном уровне, при помощи ЭВМ. Таким образом, исследования статических многощелевых спектрометров представляются актуальными. Данная работа развивает принцип действия статических спектрометров, позволяя, в конечном счете, использовать более простые многощелевые апертуры, чем в известных аналогах. Как показано ниже, данному упрощению сопутствуют некоторые преимущества.

Рассмотрим устройство предлагаемого спектрометра. Аналогично традиционным дисперсионным оптическим спектрометрам он имеет коллиматор, диспергирующий элемент и объектив. Подобно аналогам [5–7], в фокальной плоскости коллиматора данного спектрометра находится многощелевая входная апертура, имеющая вид плоской прямоугольной матрицы из прозрачных и непрозрачных прямоугольных участков равного размера (щелей и „не щелей“), а в фокальной плоскости объектива находится многоканальный детектор матричной структуры. Одна из сторон входной апертуры ориентирована параллельно направлению дисперсии диспергирующего элемента. Будем условно называть данное направление „горизонтальным“. ЭВМ находит спектр из изображения, регистрируемого данным детектором, и выводит



Примеры входных многощелевых апертур: *a* — предложенная в данной работе; *b* — основанная на матрице с линейно независимыми столбцами [5–7]. Направление дисперсии совмещено с горизонталью.

результат через устройство вывода, например монитор. Изображение в фокальной плоскости объектива, формируемое коллиматором, диспергирующим элементом и объективом, является суперпозицией отдельных монохроматических изображений входной апертуры, сдвинутых относительно друг друга в горизонтальном направлении. Щели и „не щели“ входной апертуры чередуются в определенном порядке, позволяющем однозначно найти из данного изображения спектр с разрешающей способностью, определяемой шириной отдельных щелей данной апертуры. Данный спектрометр отличается от известных аналогов тем, что порядок чередования щелей и „не щелей“ его входной апертуры и поиск спектра основаны на комплементарных последовательностях Голея. Благодаря этому многощелевая апертура имеет всего четыре горизонтальных ряда щелей. При этом число вертикальных рядов щелей может быть как угодно большим. Высота и ширина апертуры зависят от конструкции спектрометра. На рисунке, *a* для наглядности представлен пример такой апертуры.

Поясним математическую сторону принципа данного спектрометра. Входную апертуру опишем матрицей  $A$ , элементы которой соответствуют входной апертуре по правилу: щель — 1, „не щель“ — 0. Например,

1\* Письма в ЖТФ, 2008, том 34, вып. 11

апертуре на рисунке,  $A$  соответствует матрица

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Матрица  $A$  построена так, что существует матрица  $B$  того же размера, такая, что функция корреляции данных матриц при их относительном смещении в горизонтальном направлении обращается в нуль лишь при ненулевом смещении:

$$\sum_{m,n} A_{m,n} B_{m,n-k} = \alpha \delta_{0,k}, \quad (2)$$

где  $k$  — смещение (разность фаз),  $\alpha$  — отличное от нуля число,  $\delta$  — дельта Кронекера. Например, матрице  $A$  (1) соответствует матрица

$$B = \begin{pmatrix} + & - & + & + & + & - & - & - \\ - & - & - & + & - & - & + & - \\ - & + & - & - & - & + & + & + \\ + & + & + & - & + & + & - & + \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где для удобства чтения  $+1$  и  $-1$  обозначены как „+“ и „-“ соответственно (данное обозначение применяется и ниже в аналогичных случаях). Благодаря свойству (2), при помощи матрицы  $B$  можно однозначно определять интенсивность отдельных монохроматических изображений входной апертуры, составляющих изображение в фокальной плоскости объектива, несмотря на то что данные монохроматические изображения частично „накладываются“ друг на друга. Для этого нужно умножить двумерную функцию интенсивности изображения в фокальной плоскости объектива на двумерную функцию „изображение“ матрицы  $B$ , совмещенную с изображением входной апертуры интересующей длины волны, и проинтегрировать данное произведение по обеим пространственным координатам. Значение данного интеграла определяется лишь интенсивностью соответствующей длины волны. Таким образом, можно последовательно найти значения всех спектральных составляющих.

Рассмотрим построение матриц  $A$  и  $B$  в общем виде. Данное построение основано на комплементарных последовательностях Голя [8], под которыми здесь будем понимать пары последовательностей чисел  $+1$

и  $-1$ , сумма функций автокорреляции которых не обращается в нуль лишь при нулевой разности фаз:

$$\sum_n a_n a_{n-k} + \sum_n b_n b_{n-k} = \beta \delta_{0,k}, \quad (4)$$

где  $\beta$  — отличное от нуля число. Известные способы позволяют строить последовательности длины  $2^a 10^b 26^c$ , где  $a, b, c$  — любые целые числа. Например, комплементарными являются последовательности

$$a = (+ - + + + - - -) \text{ и } b = (- - - + - - + -). \quad (5)$$

Построение матрицы  $B$  заключается в том, что данная матрица имеет четыре строки, элементы двух из которых равны соответствующим элементам некоторой пары комплементарных последовательностей Голея, а элементы двух остальных строк равны элементам данных последовательностей с отрицательным знаком. Например, матрица (3) получена таким образом из последовательностей (5). Далее, элементы матрицы  $A$  должны соответствовать элементам матрицы  $B$  посредством уравнения

$$A_{m,n} = (B_{m,n} + 1)/2, \quad (6)$$

что иллюстрируется матрицей (1). На основе определения комплементарных последовательностей (4) легко доказать в общем виде, что построенные матрицы  $A$  и  $B$  обладают свойством (2).

Сравним полученный результат с известными аналогами [5–7]. В них для построения пар матриц  $A$  и  $B$ , обладающих свойством (2), применяется вспомогательное условие ортогональности их столбцов

$$\sum_m A_{m,i} B_{m,j} = \gamma \delta_{i,j}, \quad (7)$$

где  $\gamma$  — отличное от нуля число. Из вышеизложенного понятно, что данное условие (7) является достаточным для этого, но не необходимым. Для выполнения условия (7) число строк соответствующих матриц должно быть не менее числа столбцов. При этом столбцы матрицы  $A$  оказываются линейно независимыми. Соответствующий пример приведен на рисунке,  $b$  [5]. Очевидно, что в данном случае для увеличения числа вертикальных рядов щелей входной апертуры необходимо увеличивать и число горизонтальных рядов щелей. На практике имеются

факторы, осложняющие увеличение числа горизонтальных рядов. Так, в идеальном случае горизонтальные границы между изображениями отдельных горизонтальных рядов щелей входной апертуры должны совпадать с горизонтальными границами между пикселями детектора [5,6]. В действительности трудно осуществить сборку спектрометра с достаточной для этого точностью и жесткостью. Кроме того, оптическая система неизбежно вносит нечеткость в изображение, описываемую функцией рассеяния точки [6,7]. Для обхода данных сложностей между горизонтальными рядами щелей апертуры помещаются горизонтальные непрозрачные полосы, разделяющие данные ряды щелей [6,7]. При этом снижается пропускающая способность апертуры, например на 40% [6] или 20% [7]. Кроме того, такие разделительные полосы могут быть необходимы для обеспечения механической прочности апертуры в случае, если она не имеет несущего прозрачного слоя, что может быть актуально для спектральных диапазонов, в которых ограничен выбор прозрачных материалов [4].

Таким образом, представленный в данной работе статический многощелевой спектрометр имеет входную апертуру, состоящую из четырех горизонтальных рядов щелей, благодаря чему спектрометр более прост в изготовлении и имеет меньшие потери излучения на вспомогательных разделительных непрозрачных участках между горизонтальными рядами щелей по сравнению с известными аналогами.

## Список литературы

- [1] *Golay M.J.E.* // J. Opt. Soc. Am. 1949. V. 39. P. 437.
- [2] *Golay M.J.E.* // J. Opt. Soc. Am. 1951. V. 41. P. 468.
- [3] *Girard A.* // Appl. Opt. 1963. V. 2. P. 79.
- [4] *Шлишевский В.Б.* Теория и практика светосильной растровой спектроскопии. Новосибирск: СГГА, 2005.
- [5] *Gehm M.E., McCain S.T., Pitsianis N.P., Brady D.J., Potuluri P., Sullivan M.E.* // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 2965.
- [6] *Fernandez C., Guenther B.D., Gehm M.E., Brady D.J., Sullivan M.E.* // Optics Express. 2007. V. 15. P. 5742.
- [7] *McCain S.T., Gehm M.E., Wang Y., Pitsianis N.P., Brady D.J.* // Appl. Spectrosc. 2006. V. 60. P. 663.
- [8] *Golay M.J.E.* // IRE Trans. of Inform. Theory. 1961. V. IT-7. P. 82.