

КОМПЛЕМЕНТАРНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ГОЛЕЯ В МНОГОЩЕЛЕВОЙ ДИСПЕРСИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2008 г. А. В. Кузнецов*, Е. Ф. Мартынович**, доктор физ.-мат. наук

* Иркутский государственный университет, Иркутск

** Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, Иркутск

E-mail: a.v.kuznetsov@bk.ru

Предложено новое применение комплементарных последовательностей Голя в многощелевой оптической дисперсионной спектроскопии, отличающейся от традиционной дисперсионной оптической спектроскопии применением сложных многощелевых апертур вместо одинарных щелей для повышения светосилы. Точнее, на основе данных последовательностей разработаны новые пары числовых последовательностей, имеющие единственный максимум функции корреляции, которые могут использоваться в многощелевых спектрометрах для построения многощелевых апертур и поиска спектров. Представленные последовательности отличаются от известных аналогов большей простотой при столь же высокой светосиле. Возможность реализации предлагаемых последовательностей продемонстрирована на примере нескольких схем спектрометров.

Коды OCIS: 300.6190, 120.6200.

Поступила в редакцию 15.11.2007.

Введение

Как известно, спектральная разрешающая способность и отношение сигнал/шум традиционного дисперсионного оптического спектрометра зависят от ширины входной и выходной щелей данного прибора. Более узкие щели позволяют разрешить более узкие спектральные линии. Однако в случаях, когда невозможно сфокусировать все исследуемое излучение на входной щели, уменьшение ширины данной щели приводит к снижению потока излучения, что вызывает снижение полезного сигнала, и следовательно, отношения сигнал/шум прибора. Для того чтобы преодолеть данное ограничение традиционных спектрометров, разработаны дисперсионные спектрометры, отличающиеся тем, что имеют вместо одинарных входной и выходной щелей более сложные системы отверстий, за счет большей суммарной площади которых достигается большая светосила и большее отношение сигнал/шум. Данные системы отверстий будем называть многощелевыми апертурами (которые также известны как растры, маски, кодовые апертуры), а соответствующие спектрометры – многощелевыми спектрометрами. Для подробного обзора исследований в данной области можно обратиться, например, к монографии В.Б. Шлишевского [1].

Наша работа связана с многощелевыми спектрометрами, основанными на парах числовых последовательностей, функция корреляции которых имеет единственный максимум. Мы вводим здесь новые пары числовых последовательностей, более

удобные при использовании в многощелевых спектрометрах, чем известные аналоги, например, основанные на матрицах Адамара. Для иллюстрации в данной работе рассмотрено несколько возможных схем спектрометров, основанных на введенных последовательностях. Данные схемы, являясь лишь примерами, не исчерпывают всех возможных вариантов реализации введенных последовательностей.

Числовые последовательности

В многощелевых спектрометрах пары числовых последовательностей, функция корреляции которых имеет единственный максимум, используются для построения входной многощелевой апертуры и для поиска спектра из изображения в фокальной плоскости объектива. Будем описывать данные последовательности векторами $\mathbf{I}_i$ и $\mathbf{O}_i$, $i = 1 \dots N$ соответственно. При этом подразумевается, что отдельные векторы соответствуют “вертикальным”, т. е. перпендикулярным направлению дисперсии рядам щелей многощелевых апертур. В таком случае пары числовых последовательностей, вводимые в данной работе, задаются парой уравнений

$$\mathbf{I}_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + a_i \\ 1 - a_i \\ 1 + b_i \\ 1 - b_i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{O}_i = \begin{pmatrix} a_i \\ -a_i \\ b_i \\ -b_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где a_i и b_i , $i = 1 \dots N$ – комплементарные последовательности Голя (КПГ) [2, 3], т. е. последователь-

ности чисел 1 и -1 , сумма функций автокорреляции которых обращается в нуль при отличной от нуля разности фаз

$$\sum_{i=1}^{N-k} a_i a_{i+k} + \sum_{i=1}^{N-k} b_i b_{i+k} = 2N\delta_{0,k}, \quad k > 0. \quad (2)$$

Здесь и далее k – разность фаз, δ – дельта Кронекера.

Например, для $N = 8$ КППГ могут иметь вид

$$a = (+ - + + + - - -) \text{ и } b = (- - - + - - + -), \quad (3)$$

где “+” и “-” означают 1 и -1 соответственно (данное обозначение используется и ниже). Последовательности векторов (1), построенные на основе КППГ (3), представленные для удобства чтения в форме матриц, имеют вид

$$\mathbf{I}_{1...8} = \begin{pmatrix} + & 0 & + & + & + & 0 & 0 & 0 \\ 0 & + & 0 & 0 & 0 & + & + & + \\ 0 & 0 & 0 & + & 0 & 0 & + & 0 \\ + & + & + & 0 & + & + & 0 & + \end{pmatrix} \text{ и} \quad (4)$$

$$\mathbf{O}_{1...8} = \begin{pmatrix} + & - & + & + & + & - & - & - \\ - & + & - & - & - & + & + & + \\ - & - & - & + & - & - & + & - \\ + & + & + & - & + & + & - & + \end{pmatrix}.$$

Непосредственно из определения КППГ (2) следует, что функция корреляции последовательностей векторов (1) равна нулю при ненулевой разности фаз

$$\sum_i \mathbf{I}_i \mathbf{O}_{i+k} = 2N\delta_{0,k}. \quad (5)$$

Здесь векторы умножаются по правилу скалярного умножения векторов, причем для удобства записи векторы с номерами, выходящими при суммировании за границы интервала $1...N$, определены как нулевые векторы. Пример последовательностей (4) подтверждает сказанное.

Сравним полученный результат (1) с известными последовательностями аналогичного назначения, при этом четко обозначим рамки новизны данного результата и его преимущества. Для этого заметим, что М. Голеем описаны [2] входные многощелевые апертуры, соответствующие представленной последовательности $\mathbf{I}_i$ (1), следовательно, данная последовательность не является новой как самостоятельное понятие. Однако при этом использовались [2] выходные многощелевые апертуры, соответствующие (в терминах данной работы) последовательности векторов

$$\mathbf{O}'_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + a_i \\ 1 - a_i \\ -1 + b_i \\ -1 - b_i \end{pmatrix}, \quad (6)$$

которая отлична от предложенной здесь последовательности $\mathbf{O}_i$ (1) и дает вдвое меньший сигнал. Поэтому уточним, что новизна нашей работы заключается в паре последовательностей (1) как едином понятии (подобно понятию КППГ).

Широко известны последовательности, состоящие из ортогональных векторов [1], например, основанные на матрицах Адамара. Особенность таких последовательностей заключается в том, что размерность их векторов не меньше числа векторов N , которое, как правило, много больше четырех. Как следствие, увеличение числа вертикальных рядов щелей приводит к увеличению числа горизонтальных рядов (рис. 1а [4]). Последнее на практике осложняется рядом обстоятельств. Например, часто приходится разделять горизонтальные ряды щелей непрозрачными горизонтальными полосами. Это делается [2] для обеспечения механической прочности многощелевой апертуры без прозрачной несущей подложки, что может быть актуально для спектральных диапазонов, в которых ограничен выбор прозрачных материалов [1]. Другая цель введения разделительных полос – уменьшение влияния неизбежной неточности совмещения выходной апертуры с изображениями входной апертуры и влияния нечеткости данных изображений, вносимой оптической системой. При этом полезная площадь апертуры снижается, например, на 40 [5] или 20% [6]. Таким образом, сокращение числа горизонтальных рядов щелей до четырех (рис. 1б) позволяет повысить светосилу спектрометра при фиксированном размере многощелевой апертуры и заданной ширине разделительных полос или, наоборот, увеличить

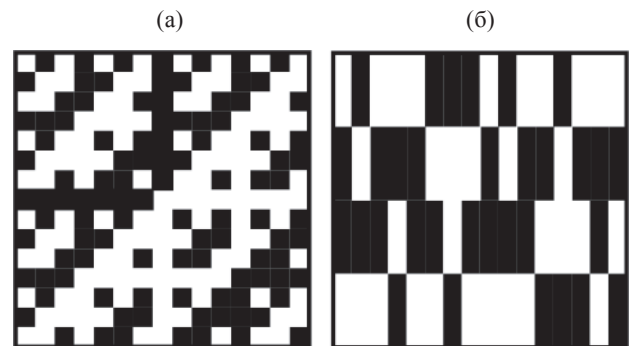


Рис. 1. Сравнение входных многощелевых апертур, построенных на основе матрицы Адамара [4] (а) и на основе КППГ [2] (б). Данные апертуры имеют одинаковую светосилу и разрешающую способность.

ширину разделительных полос без значительного снижения светосилы.

Другое преимущество уменьшения числа горизонтальных рядов щелей возникает в случае, когда вместо выходной многощелевой апертуры применяются многоканальные приемники матричной структуры [5–7]. Точнее, при этом становится возможным уменьшение числа пикселей приемника вдоль вертикального направления и повышение эффективности алгоритма поиска спектра в случае применения ЭВМ за счет сокращения объема обрабатываемой информации.

Варианты реализации

Для того чтобы показать связь теории с практикой, рассмотрим возможные схемы спектрометров, построенные на основе представленной пары последовательностей (1). Данные схемы подобны ряду известных спектрометров.

В первой схеме исследуемое излучение падает на входную многощелевую апертуру, основанную, аналогично одной из схем М. Голея [2], на последовательности векторов I_i (1) по правилу: 1 – щель, 0 – “не щель”. На рис. 2а приведена входная апертура, соответствующая последовательности $I_{1...8}$ (4). Входная апертура находится в фокальной плоскости коллиматора, направляющего излучение на диспергирующий элемент. Объектив фокусирует излучение на плоскости, в которой находится выходная многощелевая апертура. Изображение в данной плоскости является суперпозицией монохроматических изображений входной апертуры, смещенных друг относительно друга в направлении дисперсии, совмещенном на иллюстрациях с горизонталью. Выходная

многощелевая апертура подвижна в горизонтальном направлении. Как показано на рис. 2б, она имеет ширину в два раза большую, чем ширина монохроматических изображений входной апертуры, и состоит из двух половин, одна из которых идентична входной апертуре, а вторая является ее “негативом”. Данные половины выходной апертуры перекрываются отдельными одноканальными приемниками (изображены штрихами на рис. 2б). При измерении спектра, выходная апертура перемещается в горизонтальном направлении подобно выходной щели традиционного спектрометра. Сигналы приемников как функции положения выходной апертуры при этом записываются некоторым устройством, например, ЭВМ. Разность фаз данных сигналов, равная половине ширины выходной апертуры, возникающая вследствие пространственного опережения одного приемника другим при перемещении данной апертуры, устраняется. После этого находится разность данных сигналов (“+” и “–” на рис. 2б указывают знак, с которым сигнал соответствующего приемника входит в итоговый сигнал). Очевидно, при этом описанная выходная апертура соответствует последовательности векторов O_i (1) и согласно теории многощелевых спектрометров [1] итоговый сигнал соответствует искомому спектру.

Обсудим одну из проблем, возможных при реализации описанной схемы. На практике приемники неэквивалентны, т. е. имеют различные чувствительности $f_1(\lambda)$ и $f_2(\lambda)$, зависящие от длины волны λ . Чтобы избежать искажения выходного сигнала, следует скомпенсировать данную неэквивалентность. Для этого ищется функция $c(\lambda)$, удовлетворяющая уравнению $f_1(\lambda) = c(\lambda)f_2(\lambda)$. Если данная функция достаточно гладкая, т. е. с достаточной точностью яв-

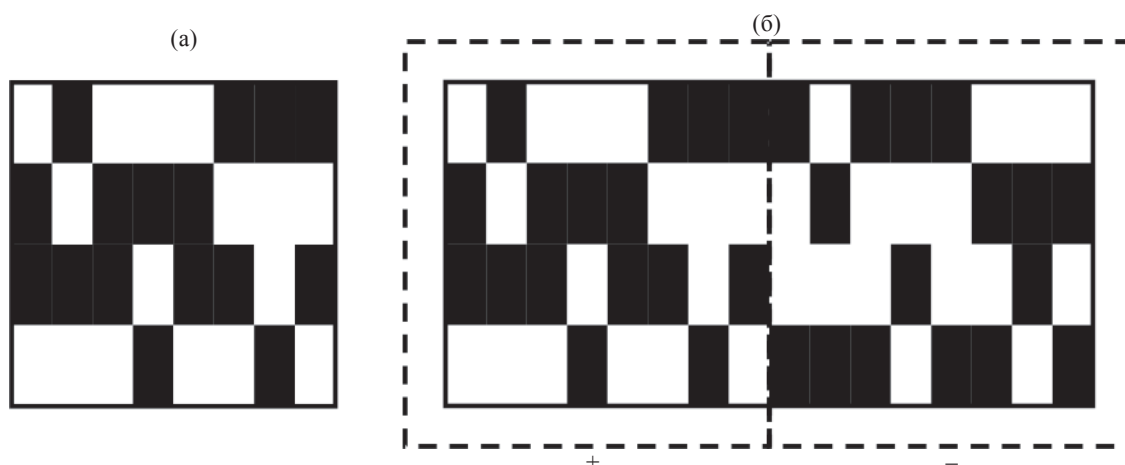


Рис. 2. Пример многощелевых апертур для предложенной в данной работе схемы со сканирующей выходной апертурой. а – входная апертура [2], б – предложенная здесь выходная апертура с двумя одноканальными детекторами (обозначены штрихами). Символы “+” и “–” обозначают знак, с которым сигнал соответствующего детектора входит в общий сигнал.

ляется константой для длин волн, одновременно попадающих на любой из рассматриваемых приемников, то неэквивалентность приемников может компенсироваться умножением сигнала первого приемника на значения функции $c(\lambda)$, соответствующие длинам волн, “центральный” по отношению к первому приемнику при его соответствующих положениях. Если функция $c(\lambda)$ недостаточно гладкая, скомпенсировать неэквивалентность приемников таким способом невозможно, что накладывает соответствующее ограничение на пару используемых приемников.

Вторая возможная схема аналогична статическим спектрометрам [5, 6] и отличается от первой схемы тем, что имеет неподвижный многоканальный матричный приемник вместо сканирующей выходной апертуры, регистрирующий изображение в фокальной плоскости объектива. Спектр находится из данного изображения с помощью ЭВМ. Для этого используется двумерная функция, соответствующая последовательности $O_i(1)$, работающая как “виртуальная” выходная апертура. Данная функция “перемещается” в горизонтальном направлении относительно развертки спектра, умножаясь при этом на нее.

Рассмотрим еще одну возможную схему, основанную на применении отражающей входной апертуры. Подобные апертуры, состоящие из прозрачных и зеркальных участков, использовались, например, А. Жираром [8]. Отражающая апертура позволяет использовать не только ту часть входного излучения, которая проходит через ее прозрачные участки, но и отраженную часть излучения. Таким образом, отражающая входная апертура работает подобно двум обычным (неотражающим) апертурам. Пусть, например, отражающая входная апертура построена на основе второго и третьего горизонтальных рядов входной апертуры, изображенной на рис. 1а, чтобы выглядеть в проходящем свете как показано на рис. 3а. Тогда в отраженном свете так, она будет иметь вид, как на рис. 3б. Легко заметить, что рис. 3б соответствует первому и четвертому горизонтальным рядам входной апертуры на рис. 1а, что следует из определения последовательности $I_i(1)$. Следовательно, такая отражающая апертура эквивалентна апертуре на рис. 1а, но имеет вдвое большую полезную площадь. Прошедшая через данную входную апертуру и отраженные от нее части входного излучения далее должны обрабатываться одинаковым образом: пройти через отдельные коллиматоры, диспергирующие элементы, объективы [8] и регистрироваться отдельными многоканальными приемниками матричной структуры. Далее, аналогично рассмотренной выше статической схеме, с помощью ЭВМ находится спектр из

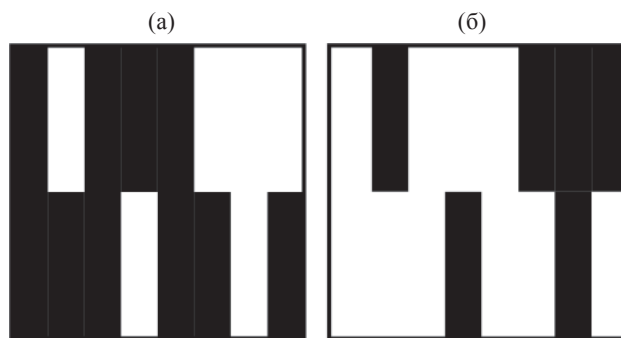


Рис. 3. Вид предложенной в данной работе отражающей входной многощелевой апертуры, построенной на основе КПП, в проходящем (а) и в отраженном свете (б).

двух изображений, регистрируемых данными приемниками.

Заключение

Таким образом, предложенные пары числовых последовательностей позволяют создавать спектрометры, многощелевые апертуры которых имеют всего по четыре горизонтальных ряда щелей, что дает различные преимущества прикладного характера, зависящие от конкретной схемы спектрометра. При этом не выявлено каких-либо недостатков такого подхода по сравнению с применением матриц Адамара или иных систем ортогональных векторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлишевский В.Б. Теория и практика светосильной растровой спектроскопии. Новосибирск: СГГА, 2005. 264 с.
2. Golay M.J.E. Static multislit spectrometry and its application to the panoramic display of infrared spectra // JOSA. 1951. V. 41. P. 468–472.
3. Golay M.J.E. Complementary series // IRE Trans. of Inform. Theory. 1961. V. IT-7. P. 82–87.
4. Шлишевский В.Б. Растры на основе матриц Адамара для растровых спектрометров с селективной модуляцией // ОМП. 1982. № 4. С. 55–56.
5. Fernandez C., Guenther B.D., Gehm M.E., Brady D.J., Sullivan M.E. Longwave infrared (LWIR) coded aperture dispersive spectrometer // Opt. Exp. 2007. V. 15. P. 5742–5753.
6. McCain S.T., Gehm M.E., Wang Y., Pitsianis N.P., Brady D.J. Coded aperture Raman spectroscopy for quantitative measurements of ethanol in a tissue phantom // Appl. Spectr. 2006. V. 60. P. 663–671.
7. Гуд В.В., Красавцев В.М., Лысенков С.Н., Прилепских В.Д., Сандаков А.Н., Семенов А.Н., Чиков К.Н., Шлишевский В.Б. Растровый спектрометр // А. с. № 1346953. Бюл. изобр. 1987. № 39.
8. Girard A. Spectrometre a Grilles // Appl. Opt. 1963. V. 2. P. 79–87.