

ИЗОБРАЖАЮЩИЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР С ПОПЕРЕЧНЫМ СДВИГОМ

© 2013 г. Л. В. Егорова*, канд. техн. наук; А. С. Ануфриев**

* ОАО “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

** НПФ “Ракурс”, Санкт-Петербург

E-mail: ludweg@list.ru

Впервые описан изображающий фурье-спектрометр, основанный на использовании двухлучевых интерферометров с поперечным сдвигом, в которые вводятся элементы сканирования по разности хода. В этом методе сочетаются преимущества изображающих фурье-спектрометров как динамического, так и статического типа.

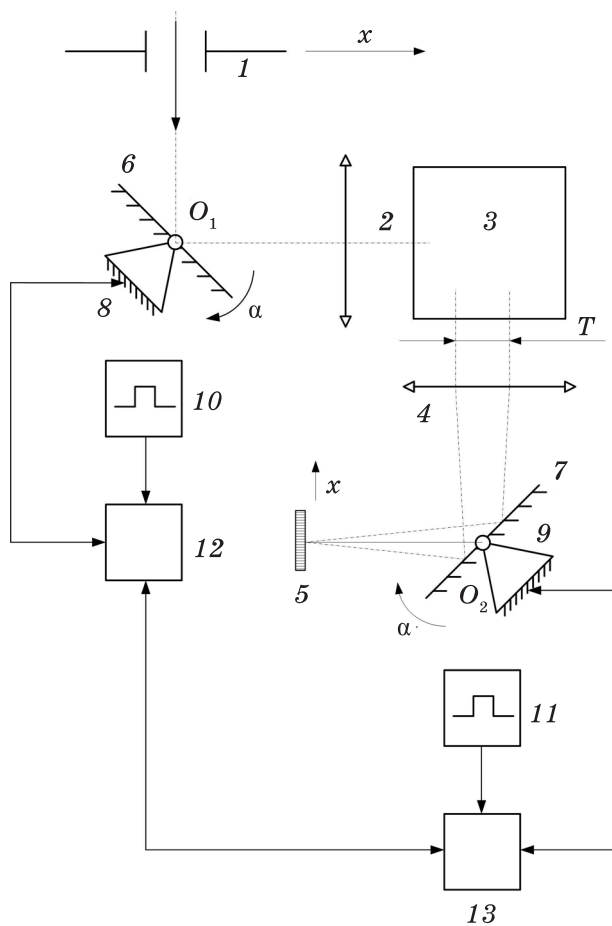
Ключевые слова: спектроскопия, фурье-спектроскопия, двухлучевые интерферометры, динамические фурье-спектрометры, статические фурье-спектрометры, интерферометры с переменным сдвигом, интерферометры с поперечным сдвигом.

Коды OCIS: 300.6300, 300.6320.

Поступила в редакцию 17.07.2013.

Известны [1] изображающие фурье-спектрометры динамического типа, содержащие двухлучевой интерферометр (обычно это интерферометр Майкельсона), в котором осуществляется сканирование по разности хода за счет перемещения во времени одного из зеркал интерферометра. На выходе такого фурье-спектрометра в фокальной плоскости выходного коллиматора строится изображение сцены. Здесь же устанавливается многоэлементное фотоприемное устройство в виде матрицы. Каждый элемент (пиксел) матрицы соответствует одному элементу из наблюдаемого множества элементов сцены. В процессе сканирования по разности хода каждый пиксел регистрирует интерферограмму спектра излучения от этого элементарного участка сцены. Требуется провести обратное преобразование Фурье для восстановления интерферограмм в спектры. Таким образом формируется “куб данных”, который содержит одновременно информацию о спектральном разрешении по длинам волн и о пространственном разрешении объекта по двум координатам пространства. Существенным недостатком изображающих фурье-спектрометров динамического типа является их повышенная чувствительность к ударам, вибрациям, изменениям температуры и другим причинам разъюстировок.

Известны [2, 3] нерасстраиваемые изображающие фурье-спектрометры статического типа, в которых изменение разности хода осуществляется не во времени, как в рассмотренных выше изображающих фурье-спектрометрах динамического типа, а в пространстве. Изображающие фурье-спектрометры статического типа имеют в своей основе двухлучевой интерферометр, например, типа Саньяка, в котором одно из зеркал смещено по нормали на некоторое расстояние. В результате этого интерферирующие фронты приобретают поперечный сдвиг и интерферируют в фокальной плоскости выходного фурье-объектива, образуя систему прямых эквидистантных полос, представляющую собой обычную интерферограмму спектра источника, локализованную в пространстве. Устанавливаемая в плоскость локализации интерферограммы матрица фотоприемников регистрирует по одной координате интерферограмму (преобразуемую в дальнейшем в спектр), а по второй координате – одну из координат пространства. Для получения информации о второй пространственной координате на вход изображающего фурье-спектрометра статического типа помещается узкая щель, перемещение которой (обычно вместе с прибором) поперек сцены дает искомую информацию о второй координате пространства.



Блок-схема изображающего динамического фурье-спектрометра с поперечным сдвигом. 1 – входное отверстие, 2 – входной объектив, 3 – двухлучевой интерферометр с поперечным сдвигом интерферирующих лучей, T – размер сдвига, 4 – фурье-объектив, 5 – матрица фотоприемников, 6, 7 – поворотные зеркала, 8, 9 – серводвигатели, 10, 11 – прецизионные абсолютные датчики угловых положений (абсолютные энкодеры), 12, 13 – элементы сервопривода.

Недостатком изображающих фурье-спектрометров статического типа является их низкая светосила из-за наличия на входе прибора узкой щели, ширина которой определяется размерами единичного пикселя матричного фотоприемника и не превышает нескольких микрометров. К недостаткам этого класса изображающих фурье-спектрометров можно отнести и обязательное присутствие цилиндрической оптики, роль которой состоит в построении изображения элементов входной щели на столбцах матрицы фотоприемников. Фундаментальным ограничением класса всех известных в настоящее время статических фурье-спектрометров является их относительно

низкая разрешающая способность, которая не превышает количества пикселей в строке используемого матричного фотоприемника. Это ограничивает область их применения, лишает универсальности, свойственной динамическим фурье-спектрометрам. В настоящей работе впервые описан некий гибридный метод фурье-спектрометрии [4], основанный на использовании двухлучевых интерферометров с поперечным сдвигом, в которые вводят элементы сканирования по разности хода. Предлагаемое название соответствующего устройства – динамический фурье-спектрометр с поперечным сдвигом (ДФСПС). В этом новом методе сочетаются преимущества рассмотренных выше изображающих фурье-спектрометров – как динамического, так и статического типа. Обратимся к рисунку, где представлена оптическая схема изображающего ДФСПС.

Изображающий ДФСПС содержит по ходу луча входную апертуру 1 прямоугольной формы, в плоскость которой проецируется изображение участка сцены, входной объектив 2, двухлучевой интерферометр 3 с поперечным сдвигом T интерферирующих лучей, причем интерферометр может быть выполнен на основе схемы интерферометра Майкельсона, или на основе обратно-круговой схемы интерферометра Саньяка, или по какой-либо другой схеме. Пары когерентных лучей, покидающие интерферометр 3 с поперечным сдвигом T , падают на Фурье-объектив 4, в задней фокальной плоскости которого они интерферируют. Там же находится и изображение участка сцены. В плоскости локализации интерференционной картины устанавливается многоэлементное фотоприемное устройство 5 (матрица фотоприемников). При условии, что фокусные расстояния входного объектива 2 и Фурье-объектива 4 одинаковы, площадь входной апертуры равна площади матрицы, следствием чего является высокая светосила ДФСПС.

Из рисунка следует, что в оптическую схему введены плоские зеркала 6 и 7, снабженные осями поворота O_1 и O_2 . Суть метода состоит в том, что в процессе синхронного поворота обоих зеркал происходит сканирование по разности хода каждой точки входной апертуры. Плоские поворотные зеркала 6 и 7 устанавливаются таким образом, чтобы расстояние от входной апертуры 1 до зеркала 6 равнялось расстоянию от зеркала 7 до матрицы 5. Зеркала устанавливаются под одинаковым углом, например, 45° к оптической оси, в результате чего они оказы-

ваются взаимно перпендикулярными. Зеркала поворачиваются вокруг осей O_1 и O_2 , перпендикулярных плоскости рисунка, лежащих в плоскости самих зеркал и проходящих через оптическую ось. Кроме того, оси поворота зеркал перпендикулярны к плоскости, в которой происходит поперечный сдвиг интерферирующих лучей, т.е. к плоскости рисунка. Направление поворота обоих зеркал одинаково. Углы поворота и угловая скорость зеркал должны совпадать.

Рассмотрим более подробно работу устройства. Пусть оба зеркала повернуты вокруг указанных выше осей на угол α . Это означает, что для внеосевых точек в плоскости входной апертуры I , находящихся под углом 2α к оптической оси, излучение отклоняется поворотным зеркалом β на оптическую ось. Далее оно проходит интерферометр строго по оптической оси так, что когерентные фронты могли бы интерферировать с нулевой разностью хода на оптической оси фурье-объектива. Однако присутствующее между фурье-объективом и матрицей фотоприемников поворотное зеркало γ отклоняет излучение с нулевой разностью хода на тот же угол 2α , в результате чего нулевая интерференционная полоса смещается в плоскости матрицы фотоприемников с оптической оси в точку, являющуюся геометрическим изображением соответствующей точки в плоскости входной диафрагмы.

В процессе синхронного поворота обоих зеркал в каждый момент времени разность хода равна нулю для такого угла α с осью (или координаты x в плоскости входной апертуры или матрицы), для которого излучение проходит интерферометр по оптической оси. Ахроматическая интерференционная полоса, соответствующая нулевой разности хода, как бы "бежит" по матрице фотоприемников в процессе синхронного поворота зеркал β и γ . При этом изображение сцены в плоскости матрицы остается неподвижным. В результате величина разность хода (Δ) между интерферирующими лучами описывается выражением

$$\Delta = T(x/F + 2\alpha), \quad (1)$$

где кроме уже введенных выше и на рис.1 величин α , T и x , F – фокусное расстояние фурье-объектива. Разрешающая способность статических фурье-спектрометров до сих пор ограничивалась общим количеством пикселей N в строке матрицы. В предлагаемом в статье устройстве она определяется как

$$R_0 = N + (2T\alpha/\lambda), \quad (2)$$

где λ – длина волны. Чем больше угол α поворота зеркал, тем больше превышение разрешающей способности изображающего ДФСФС над разрешением обычных изображающих фурье-спектрометров статического типа.

Отметим некоторые особенности метода. Пусть в начальном положении угол поворота зеркал α таков, что нулевая полоса смещена на один из крайних столбцов матрицы. Начинается сканирование по углу до момента, когда нулевая полоса оказывается на другом конце строки. Регистрация сигнала происходит в моменты смещения нулевой полосы ровно на один пиксел. В результате каждый пиксел регистрирует N отсчетов, но положение нулевой разности хода в зарегистрированном массиве данных каждого пиксела в строке свое собственное. Для пиксела на оптической оси интерферограмма является двухсторонней. У крайних пикселей она строго односторонняя. Соответственно и спектральное разрешение крайних пикселей вдвое превышает разрешение на оптической оси. Алгоритмы восстановления спектров должны будут учитывать эту особенность метода. Референтный лазерный канал в ДФСФС отсутствует. Вместе с тем необходим канал белого света, регистрируемый 1-й и 2-й строками в верхней или нижней частях матрицы. Пока нулевая полоса находится в пределах матрицы, главный максимум интерферограммы в канале белого света управляет снятием отсчетов с пикселей матрицы. Если установить на входе канала белого света плоско-параллельную пластинку (пленку) с целью получения боковых ахроматических пиков [5], то возможно дополнительно увеличить спектральное разрешение, увеличивая угол α так, что нулевая разность хода покинет матрицу, а управление снятием отсчетов возьмут на себя боковые ахроматические пики канала белого света.

Было осуществлено предварительное экспериментальное исследование макета изображающего ДФСФС, в котором интерферометр представлял собой предложенную авторами в работе [6] склейку по гипотенузным граням двух идентичных призм с углами при вершинах 30, 60 и 90°. Призмы при этом были склеены с некоторым сдвигом, в результате которого поперечный сдвиг интерферирующих лучей составил $T = 4,5$ мм. Система сканирования в макете представляла собой параллелограммный механизм, в двух вершинах которого были

установлены плоские поворотные зеркала, а привод осуществлялся от двигателя через пару винт–гайка. Целью исследования было подтверждение наличия эффекта смещения нулевой полосы в фокальной плоскости фурье-объектива без изменения шага полос и определение максимальных углов поворота зеркал. Регистрация изменений в интерференционной картине в процессе сканирования осуществлялась визуально с помощью микроскопа.

Было установлено, что в процессе синхронного поворота зеркал нулевая интерференционная полоса, как и ожидалось, смещается в фокальной плоскости фурье-объектива. При этом не обнаружено изменения периода интерференционных полос. Удалось зафиксировать указанный эффект в пределах $\pm 4^\circ$ поворота зеркал. Это означает, что при сдвиге $T = 4,5$ мм увеличение разрешающей способности оказывается в соответствии с формулой (2) равным 1260, что достаточно существенно, учитывая, что количество пикселей N (и разрешающая способность обычных статических фурье-спектрометров) из формулы (2), как правило, равно 512 или 1024.

С целью реализации высокоточного и синхронного поворота обоих зеркал предполагается снабдить их интегрированной электроприводной динамической системой. Указанную систему предполагается разработать на основе существующего оборудования: прецизионного абсолютного датчика угловых положений (абсолютного энкодера) [7] – поз. 10 и 11 на рисунке, серводвигателя [8] – поз. 8 и 9 и сервопривода [9] – поз. 12 и 13. Стрелками на рисунке обозначены информационные, сигнальные и силовые связи между этими устройствами. В случае применения интегрированной электродинамической системы для сканирования по разности хода требуемая точность и синхронность угловых поворотов зеркал обеспечиваются примерно с трехкратным запасом. Время сканирования не будет превосходить несколь-

ких секунд в зависимости от требуемого спектрального разрешения.

Таким образом, для ДФСФС снимается фундаментальное ограничение статических фурье-спектрометров на разрешающую способность, что резко расширяет область их возможного применения. При этом светосила данного устройства – гигантская, она ограничивается только площадью используемой матрицы фотоприемников. Процесс регистрации интерферограммы занимает время, в течение которого зеркала поворачиваются вокруг своих осей с помощью инновационных устройств, каковыми являются электроприводные динамические системы типа абсолютного энкодера. Однако, все существующие изображающие фурье-спектрометры требуют времени на сканирование либо по разности хода, либо по второй координате пространства. В предлагаемом устройстве сканирование осуществляется, как и в динамических фурье-спектрометрах, по разности хода, а не по пространству, но требуемая точность такого сканирования существенно ниже, что позволяет реализовать его достаточно простыми средствами за счет применения известных абсолютных энкодеров. Предлагаемое устройство не является в чистом виде ни статическим, ни динамическим фурье-спектрометром, а занимает промежуточное положение, обладая преимуществами обоих типов приборов. Предполагаемая область применения изображающего ДФСФС – гиперспектральные исследования в режиме *windowing* [10] обширных участков сцены, стабильных по яркости в течение нескольких секунд. Прибор может быть применен для медицинской диагностики с целью выявления аномалий кожного покрова или иных плоских протяженных участков организма человека по изменениям в регистрируемых спектрах рассеяния.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов Г.Г., Демин А.В., Никифоров В.О., Савицкий А.М., Скворцов Ю.С., Сокольский М.Н., Трегуб В.П. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 75–82.
2. Otten L.J., Jones B.A., Edwards A., Lane J., Gaudill T.R., Osweiler V., Yarbrough S., Arnold J., Quarles R., Kouba E.T. Space based hyperspectral imagery of the Moon and Earth limb// Proc. SPIE. 2001. V. 4540. P. 88 – 98.
3. Грязнов Г.М., Егорова Л.В., Стариченкова В.Д., Таганов О.К. Интерференционный спектрометр// Патент РФ № 2313070. 2005.
4. Ануфриев А.С., Егорова Л.В. Изображающий Фурье-спектрометр. Положительное решение от 8.04.2013 по заявке на изобретение № 2012106395, приоритет от 21.02.12.

5. *Flournoy P.A., McClure R.W., Wyntjes G.* White-light interferometric thickness gauge// *Appl. Opt.* V. 11. № 9. P. 1907.
 6. *Егорова Л.В., Ермаков Д.С., Кувалкин Д.Г., Таганов О.К.* Фурье-спектрометры статического типа // *ОМП.* 1992. № 2. С. 3–14.
 7. <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=5&d=40>
 8. <http://www.controltechniques.ru/продукты/электродвигатели/серводвигатели/unimotorfm/unimotorfm.aspx>.
 9. <http://www.controltechniques.ru/продукты/сервоприводы/digitaxst/digitaxst.aspx>.
 10. *Sellar R.G., Boreman G.D.* Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications// *Opt. Eng.* 2005. V. 44. №1. P. 013602-1 – 013602-3.
-