

СИСТЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ БЫСТРОСКАНИРУЮЩИХ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ

© 2010 г. В. В. Архипов, канд. техн. наук

Санкт-Петербург

Рассмотрены принципы построения, классификация и роль системы сканирования – комплексного оптико-механического и электронного узла в Фурье-спектрометрах с быстрым сканированием. Приведен анализ реальных сканирующих систем, определены перспективы их развития.

Ключевые слова: Фурье-спектрометр, система сканирования, преобразователь движения, стабилизатор скорости.

Коды OCIS: 120.6200

Поступила в редакцию 18.09.2009

Фурье-спектрометры (ФС) находят широкое применение в различных областях науки и техники благодаря большой светосиле, высокой разрешающей способности, быстродействию, небольшим массе и габаритам. Они незаменимы при спектральных исследованиях планет, атмосферы Земли, метеорологических объектов, природных ресурсов.

Системой сканирования ФС принято называть совокупность узлов, содержащую подвижное зеркало и его привод с устройствами управления и контроля. Процесс сканирования в ФС обеспечивает изменение разности хода лучей и сопровождается частотной модуляцией исследуемого излучения. Наиболее привлекательным является непрерывное сканирование со скоростями, при которых модуляционные интерференционные частоты лежат в широком диапазоне вплоть до МГц. При этом нет необходимости в прерывателе, то есть в дополнительной модуляции. Такой метод принято называть быстрым сканированием [1]. Он уменьшает влияние низкочастотных шумов и флуктуаций источника излучения на результат измерений и позволяет регистрировать быстропротекающие процессы.

Основными параметрами, которые характеризуют систему сканирования, являются максимальная величина и скорость перемещения отражателя интерферометра, прямолинейность его перемещения и стабильность скорости. Максимальная величина перемещения отражателя задает предельное спектральное разрешение ФС. У большинства рассматриваемых в этой работе быстросканирующих систем ФС эта величина колеблется от единиц до десятков миллиметров и определяется требуемым спектральным раз-

решением. Скорость перемещения V определяет частоту f интерференционной модуляции. Для длины волны λ спектральной составляющей излучения зависимость между ними имеет вид $f = 2V/\lambda$.

В различных приборах скорость перемещения колеблется от долей до десятков миллиметров в секунду. При возвратно-поступательном характере движения используют одно направление движения отражателя (прямой ход) и обязательство с постоянной скоростью. Отношение времени прямого хода ко времени обратного в этом случае должно быть максимально возможным. Использование периодического режима также не исключается.

Непостоянство скорости ΔV и погрешность прямолинейности $\Delta\beta$ перемещения отражателя увеличивают уровень шума в спектре и ухудшают спектральное разрешение. Увеличение шума происходит из-за формирования в спектре ложных линий с амплитудой $\pi\Delta V/(2\Delta tV)$ в первом случае и $(\pi\sigma\beta)^2/12$ – во втором. В этих выражениях ΔV – амплитуда колебаний скорости перемещения, Δt – интервал дискретизации интерферограммы, σ – волновое число, β – максимальный угол наклона отражателя. Зависимость спектрального разрешения $\Delta\sigma$ от колебаний скорости определяется выражением $\Delta\sigma = \sigma/0,0256(\tau\Delta V/\Delta tV)^2$ [2], а от наклона отражателя выражением $\Delta\sigma = 4\sigma D\Delta\beta$ [3], где τ – постоянная времени усилительного тракта ФС, D – диаметр отражателя. Влияние колебаний скорости сохраняется даже при наличии интерференционного контроля работы системы сканирования. Оно усугубляется электронными трактами измерительного и контрольного каналов ФС. Построение

ние этих трактов идет по пути обеспечения равномерной (плоской) амплитудно-частотной и линейной фазовой характеристик в измерительном канале и фазовой задержки в контрольном канале. Достигаемый эффект полностью зависит от степени приближения реальных характеристик прибора к теоретическим оценкам.

Прямолинейность перемещения отражателя обеспечивается конструкцией направляющих. Конструкция усложняется с увеличением спектрального разрешения ФС, то есть с увеличением максимальной величины перемещения отражателя.

Классификация систем сканирования Фурье-спектрометров

Известные системы сканирования по конструктивному исполнению разделяются на две группы: электромеханические и электродинамические. Электромеханические системы сканирования содержат привод с синхронным или асинхронным двигателем и механический преобразователь вращательного движения в возвратно-поступательное. Конструктивные параметры преобразователя задают величину перемещения. По типу преобразователя системы подразделяются на группы с кулачковым, винтовым и ленточным преобразователями.

Электродинамические системы получили свое название от входящих в их состав линейных электродвигателей. Линейный двигатель содержит электрическую катушку, размещенную в поле постоянного магнита. Отражатель жестко связан с катушкой. Движение катушки является результатом взаимодействия тока в ее обмотке и поля постоянного магнита. Закон изменения тока определяет характер движения, а его амплитуда – величину перемещения. По типу направляющих электродинамические системы делятся на две группы: с направляющей кареткой и с пружинной направляющей мембранным или параллелограммного типа. Системы с кареткой могут работать как без смазки, так и со смазкой. В качестве смазывающей среды используют либо сжатый воздух, либо масло.

В процессе развития систем сканирования произошел переход от электромеханических систем к электродинамическим. Последние заняли ведущее положение, так как в них требуемое линейное перемещение обеспечивается линейными двигателями без промежуточных преобразований, то есть отражатель непосредственно связан с исполнительным органом двигателя.

Достоинствами таких систем являются простота конструкции, малое количество движущихся деталей, надежность и компактность. Не имея промежуточных преобразований движения, электродинамическая система в составе быстросканирующего ФС повышает быстродействие, а отсутствие трения в направляющих позволяет обеспечить воспроизводимость результатов измерений и достичь высокого постоянства скорости. Кроме того, легко достигается регулирование величины скорости перемещения отражателя, что является обязательным условием создания автоматизированного комплекса ФС. Отсутствие вращающихся деталей у подобных систем исключает источники вибрационных помех. Подавляющее большинство систем сканирования ФС имеет устройство стабилизации скорости перемещения отражателя. Существуют два типа таких устройств – интерференционные и индукционные. Первые содержат оптический референтный канал с источником монохроматического излучения, фотоприемником, интерферометром, усилительным трактом и электронным узлом выделения и обработки сигнала отклонения фактической скорости от заданной. Конструктивно референтный канал может быть совмещен с измерительным каналом. Существуют системы с одним или двумя (по числу каналов) автономными интерферометрами, подвижные отражатели которых всегда установлены на общем основании с подвижным отражателем измерительного интерферометра. Источником монохроматического излучения служит или безэлектродная лампа с интерференционным фильтром, или гелий-неоновый лазер. Приемником служит либо ФЭУ, либо кремниевый фотодиод. Электронный узел выделения и обработки сигнала погрешности скорости содержит фазовый компаратор и генератор стабильной частоты. Индукционные устройства стабилизации проще интерференционных устройств. Они содержат индукционный датчик скорости, который конструктивно аналогичен используемому в системе линейному двигателю, и усилитель сигнала. Устройство вводится в цепь обратной связи стабилизации скорости движения отражателя. Выбор типа устройства диктуется условиями эксплуатации и требуемой степенью стабильности скорости. Применение интерференционного устройства предпочтительнее, так как предполагает использование имеющегося у всех ФС референтного канала. При неблагоприятных условиях эксплуатации используют оба типа устройств

одновременно, составляя две цепи отрицательной обратной связи.

Принцип действия и устройство систем сканирования быстросканирующих ФС

Рассмотрение существующих систем сканирования начнем с электромеханических систем, которые составляют малочисленную группу и используются главным образом в специальных ФС в единичных экземплярах. Схема одной из электромеханических систем приведена на рис. 1 [4]. Она содержит зеркало 1, электродвигатель 4, микрометрический винт 3 и преобразователь 2. Система сканирования имеет интерференционное и индукционное устройства стабилизации скорости, а в качестве датчика содержит тахогенератор. Назначение индукционного устройства – коррекция низкочастотных колебаний скорости. Сигнал с тахогенератора 5 управляет вращением двигателя через интегратор 6 и усилитель 7. Интерференционное устройство 10 с лазерным интерферометром 11, детектором пересечения нулевого уровня 9 и импульсным преобразователем 8 корректирует высокочастотные колебания. По мнению авторов, достоинством системы является возможность медленного сканирования при работе с инерционными фотоприемниками. Наличие сухого трения в винтовой паре и погрешности изготовления деталей этой пары приводит к остаточной неравномерности скорости, трудноустранимой автоматическими устройствами. Поэтому достигнутая стабильность (отклонение $\pm 1\%$ от номинального значения скорости 0,3 мм/с) является определенным успехом разработчиков прибора.

Электромеханическая система сканирования отечественного ФС ИТ-106 [5] относится к си-

стемам с кулачковым преобразователем. Она не имеет средств стабилизации и, обеспечивая скорость сканирования порядка 0,2 мм/с, обладает стабильностью скорости в пределах 3–7% [6]. При наличии интерференционного контроля такая величина является удовлетворительной и, по мнению разработчиков, реализует спектральное разрешение 5 см⁻¹. Блок-схема системы сканирования этого типа проста. Она включает синхронный двигатель и кулачковый узел преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное. Вращение кулачка системой рычагов и толкателей преобразуется в линейное движение зеркала. Сменные рычаги позволяют изменять величину перемещения зеркала при одном и том же времени хода, что приводит к ограничению диапазона частот рабочего сигнала полосой 15–45 Гц во всех спектральных областях, на которые рассчитан прибор. Прямолинейность перемещения зеркала в обеих электромеханических системах достигнута за счет прецизионного изготовления кареток.

Электромеханическая система сканирования, аналогичная описанной выше, по способу стабилизации скорости, использована в ФС модели DA3 02 BB фирмы BOMEM INC (Канада) [7] и относится к системам с ленточным преобразователем. Стабильность скорости у этой модели не высока (10%), однако спектрометр обеспечивает разрешение не менее 0,02 см⁻¹. Большие скорости сканирования (до 30 мм/с) при величине перемещения 130 мм обеспечиваются конструкцией, схематично показанной на рис. 2. Кроме электродвигателя 1 с тахометром она содержит каретку 4, направляющий цилиндр 3 и стальную приводную ленту 2. Вращение двигателя передается каретке через приводную ленту и муфту (на рис. не показана), которая преобразует вращательное движение в возвратно-поступательное. Успех работы такой системы обеспечивается согласованностью инерционностей каретки и двигателя, а также прецизионностью направляющего цилиндра. Остаточная погрешность изготовления каретки и направляющей, влияющая на прямолинейность перемещения, компенсируется автоматической юстировкой интерферометра в реальном времени с помощью неподвижного зеркала. Можно считать, что данная система построена оптимально, так как в ней выполнены единые требования к составным частям не только механизма сканирования, но и смежных узлов ФС. Так, относительно низкая стабильность скорости компенсируется применением усили-

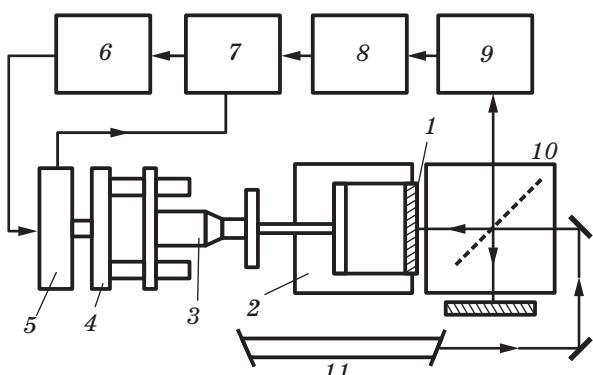


Рис. 1. Блок-схема электромеханической системы сканирования с винтовым преобразователем (пояснения в тексте).

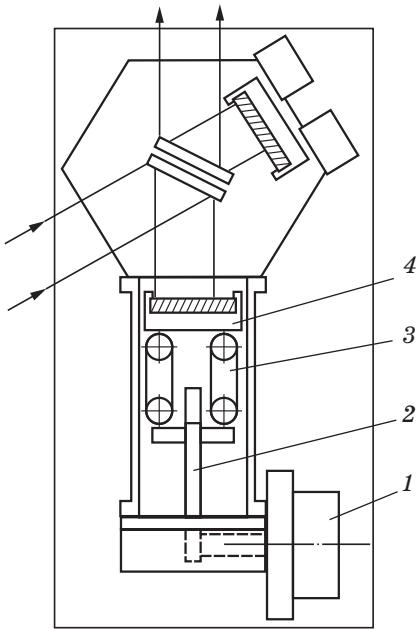


Рис. 2. Блок-схема системы сканирования Фурье-спектрометра DA3 02 BB VOMEM INC (Канада).

тельных трактов со специальными характеристиками.

В интерферометре миниатюрного ФС “АОСТ” для космических исследований [24] в качестве концевых отражателей использованы ретрорефлектоны фирмы PLX Inc, а устройством формирования их возвратно-поступательного перемещения является качающийся маятник. Схема интерферометра приведена на рис. 3. Входное излучение разделяется светоделителем 1 на два когерентных пучка, направляемых к полым зеркальным ретрорефлекторам 2 и 3, установленным на вилке 4 маятника, качающегося вокруг оси 5. Качание маятника обеспечивается двигателем, состоящим из катушки 6, неподвижно закрепленной на корпусе интерферометра, и четырех NdFeB-магнитов 7, охватывающих с двух сторон обе половины катушки. Магниты, будучи закреплены на маятнике, одновременно выполняют функцию противовесов. Двигатель включен в систему обратной связи, которая обеспечивает постоянную скорость изменения оптической разности хода, контролируя длительность периода референтного сигнала. Система стабилизации скорости построена на основе регулятора, коэффициенты которого подбирают во время работы прибора. За параметр рассогласования берется разница между измеренной и заданной синусоидальной формой референтного сигнала. Алгоритм ста-

билизации частично реализован на программируемой логической матрице ПЛМ. Оставшаяся часть алгоритма реализуется программно. Суть метода сводится к оцифровке двух составляющих референтного сигнала с частотой много большей периода опорного напряжения. Отсчеты поступают в ПЛМ, где они фильтруются и прореживаются. Вид отфильтрованного сигнала непрерывно сравнивается с вычисленной синусоидой. Сигнал рассогласования подается на регулятор двигателя. Наличие двух каналов, сдвинутых на 90° , позволяет избежать работы алгоритма в мертвых зонах.

В системе сканирования этого ФС перемещаются оба концевых отражателя, оптическая разность хода удваивается по сравнению с традиционным перемещением одного отражателя, а закономерная погрешность прямолинейности перемещения компенсируется свойствами ретрорефлекторов. Выбор системы сканирования для быстросканирующих ФС в подавляющем большинстве случаев делается в пользу электродинамических систем. Система сканирования ФС IRIS, установленного на искусственном спутнике Земли “Nimbus” [7–10], имеет мембранный подвес зеркала. Аналогичной системой сканирования снабжены спектрометры типа FT-02, FT-10 LUMEX [11], прибор для регулирования скорости привода сканирующего интерферометра и спектрометр I-6T BLOCK ASSOCIATES US [15], а также портативный ФС [12–14].

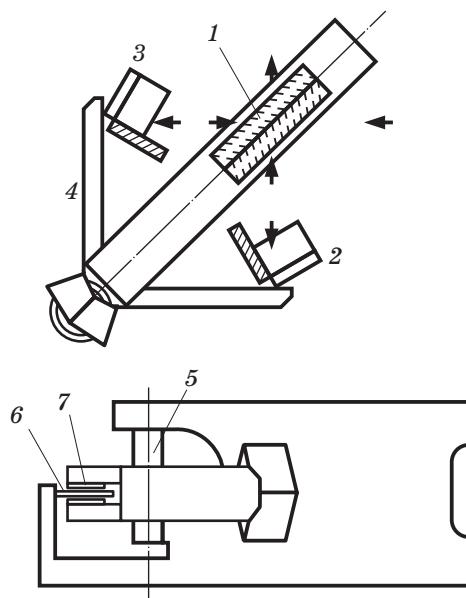


Рис. 3. Функциональная схема интерферометра Фурье-спектрометра АОСТ для космических исследований.

В системе сканирования ФС IRIS (рис. 4) зеркало 1 закреплено на одном конце подвижного штока 2. Вся подвижная система поддерживается параллельными пружинами 3, которые обеспечивают движение зеркала с минимальным наклоном. ФС этого типа имеет два устройства стабилизации: индукционное и интерференционное. Выходные сигналы обеих устройств суммируются, и результирующий сигнал подается в обмотку электродинамического двигателя. Управление скоростью обеспечивает ее стабильность на уровне 1% в специфических условиях работы искусственного спутника Земли. Такая же стабильность достигнута в приборе для регулирования скорости привода сканирующего зеркала интерферометра, работающего в лабораторных условиях. Особенностью обеих систем является отсутствие генератора пилообразного напряжения, необходимого в пружинных системах для преодоления упругого сопротивления пружин при перемещении. Его роль выполняет фазовый компаратор. Он строится на двух генераторах 6 и 8 разнополярного напряжения (рис. 5), сигналы которых поступают в сумматор 5. Разностный сигнал с выхода сумматора после усиления подается в катушку 1 двигателя и управляет перемещением зеркала 2. Генераторы пилообразного напряжения представляют собой цифроаналоговые преобразователи с реверсивными счетчиками. Для них входными сигналами служат сигналы контрольного интерферометра 3, несущего информацию о погрешности скорости и генератора стабильной частоты 7. Работа этого прибора начинается с команды "включить сканирование", которая через схему совпадений 9 открывает триггер

10. При этом эталонные импульсы поступают в генератор пилообразного напряжения 8, откуда через сумматор и усилитель 11 в обмотку двигателя. Зеркало 2 приходит в движение, вызывая появление интерференционного сигнала, проходящего через формирователь импульсов 4 на генератор пилообразного напряжения 6. Попадая на сумматор, выходное напряжение генератора 6 обеспечивает поддержание заданной скорости перемещения зеркала. Достоинствами такого способа регулирования является возможность обеспечить минимальную величину холостого хода зеркала в начале сканирования за счет выбора соответствующей величины импульсов эталонного генератора, а также установление этой величины в соответствии с параметрами подвижной части.

В отличие от описанной система сканирования ФС FT-02 и FT-10 отечественной фирмы LUMES существенно проще (рис. 6). Оптическая схема этих интерферометров представляет собой соосно совмещенную схему ретрорефлектора типа "кошачий глаз", что конструктивно позволяет разместить ее внутри пружинного подвеса параллелограммного типа 1. Сканирование осуществляется перемещением светоделителя 2 с помощью электродинамического двигателя 3, запускаемого генератором пилообразного напряжения релаксационного типа. Сигнал погрешности вырабатывается индукционным датчиком скорости, который аналогичен использованному в спектрометре IRIS. Применение одного индукционного датчика оправдано уровнем внешних воздействий в лабораторных условиях эксплуатации ФС. Конструктивно индукционный датчик подобен электродинамическому двигателю

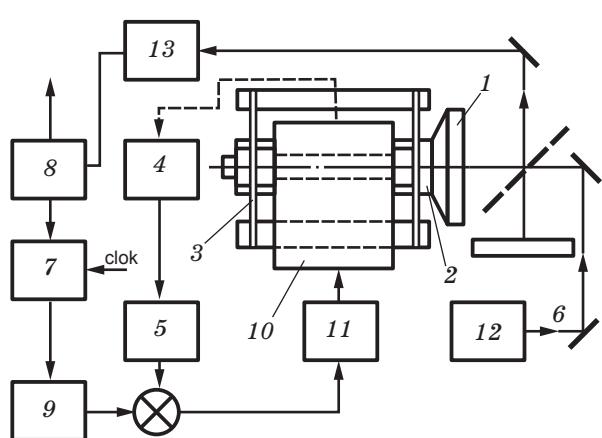


Рис. 4. Блок-схема системы сканирования Фурье-спектрометра IRIS NASA, США.

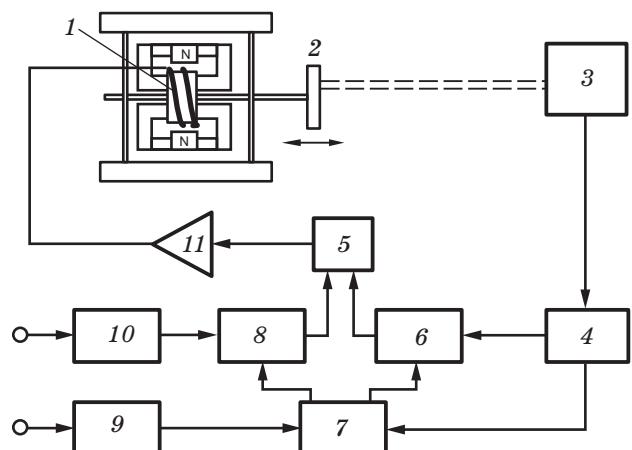


Рис. 5. Блок-схема прибора регулирования скорости привода сканирующего интерферометра Майкельсона.

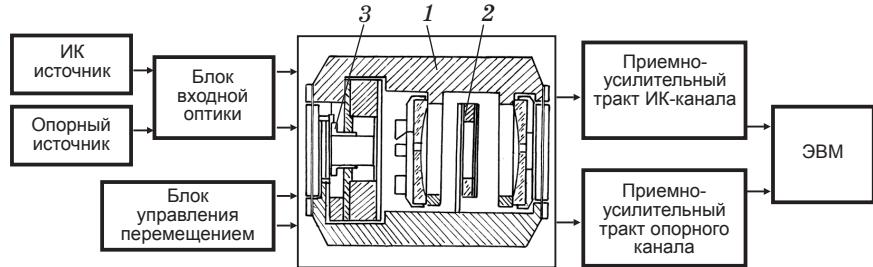


Рис. 6. Блок-схема сканирующего интерферометра Фурье-спектрометров FT-02 и FT-10 фирмы LUMEX.

и состоит из подвижной катушки и магнитной системы. При перемещении катушки в процессе сканирования в ее обмотке наводится э. д. с., пропорциональная скорости перемещения. В приборе достигнута стабильность скорости (1 мм/с) на уровне 2,5%. Остаточная нестабильность обусловлена главным образом двумя причинами: нелинейностью пилообразного напряжения (2%) и неполным демпфированием колебаний зеркала под действием внешних вибрационных помех. Использованная конструкция подвеса параллелограммного типа позволяет перемещать зеркало на большие расстояния. Подвес состоит из плоских пружин и обеспечивает прямолинейность перемещения с погрешностью менее одной угловой секунды.

Параллелограммный пружинный подвес подвижного зеркала успешно используется в интерферометре Майкельсона современной разработки отечественного портативного Фурье-спектрорадиометра (ФСР) [13], структурная схема которого приведена на рис. 7. Особенностью этой оптической схемы, по мнению авторов, является применение отдельного интерферометра референтного канала с общим подвижным зеркалом 5 и отдельным опорным зеркалом 3, которое заклонено так, чтобы на площадках ФПУ 4 формировалась интерференционная картина с разностью фаз $\lambda/2$, необходимая для определения направления движения. Обозначение остальных элементов схемы следующее: 1 – гелий-неоновый лазер, 2, 8 – светоделители, 9 – опорное зеркало, 6 – линейный двигатель, 7 – концевые датчики, 10 – ФПУ-ИК, 13 – усилитель-компаратор, 14 – блок выделения фронтов, 15 – измеритель периода, 16 – усилитель мощности, 18 – экстраполятор.

Поддержание постоянной скорости перемещения подвижного зеркала ФСР осуществляется с помощью цифровой системы управления на основе программируемых логических интеграль-

ных схем (ПЛИС). Сигнал с выхода лазерного референтного канала принимается двухэлементным фотодиодом и поступает на двухканальный усилитель и затем на компараторы, работающие по нулевому уровню. Измеренный временной интервал поступает в ПЛИС, где производится вычисление скорости и ее знака. Полученное значение скорости используется для выработки управляющего сигнала, который зависит не только от величины рассогласования реальной скорости от заданного значения V_0 , но также и от значений интеграла и производной этого рассогласования. Управляющий сигнал через экстраполятор и широтно-импульсный модулятор подается на усилитель мощности электромагнита привода линейного двигателя, который поддерживает постоянную скорость движения зеркала. Переключение направления движения зеркала обеспечивается концевыми датчиками Холла.

Многочисленную группу систем сканирования составляют электродинамические устрой-

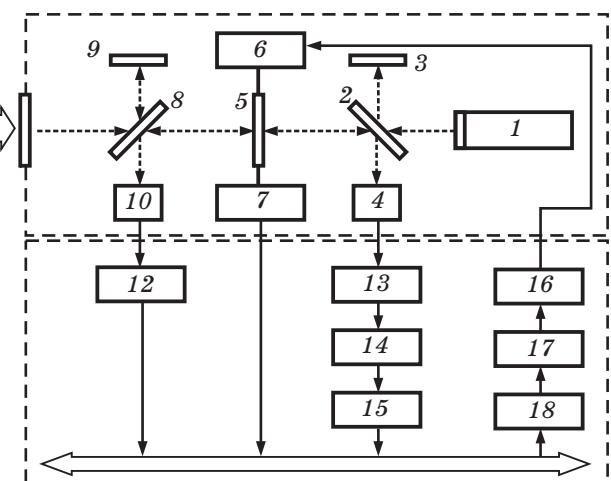


Рис. 7. Структурная схема портативного Фурье-спектрорадиометра (ФСР).

ства, содержащие направляющие на пневмоподшипниках. К ним относятся системы спектрометров лабораторного типа фирмы DIGILAB (US): FTS-10, 14, 15, 16, 20 [16, 19]; фирмы NICOET: ФС серии 7000; фирмы POLITEC: MIR – 20, 30, 160 [18]. Ряд систем работают без смазки. Примером могут служить: спектрофотометр S1-1 спутника Метеор-25 [20], а также спектрометры IF-3,16 американской фирмы IDEALAB [21, 22]. Подшипник с жидкой смазкой используется лишь в спектрометре модели FTS-12 (US) [17].

Применение пневмоподшипников позволяет осуществлять перемещение зеркала на значительную длину при сохранении прямолинейности. На рис. 8 показаны схема конструкции пневмоподшипника и блок-схема системы сканирования спектрометра FTS-14. Пневмоподшипник представляет собой коаксиальную систему цилиндров, в которой один цилиндр 2 (каретка) размещен в полости второго цилиндра 3 (направляющая) с зазором в несколько микрометров. В полость внутреннего цилиндра подается сжатый газ (обычно это воздух под давлением), который через калиброванные отверстия 4 в стенке внутреннего цилиндра поступает в зазор между цилиндрами, создавая газовую смазку. На одном торце внутреннего цилиндра с помощью кронштейна установлено зеркало 5, на другом торце – обмотка двигателя 1. Давление в пневмомагистрали обычно составляет около 2 кгс/см². Рассматриваемая система содержит автономный интерферометр 9, выполненный в виде съемного блока. Его подвижное зеркало 8 закреплено на тыльной (нерабочей) стороне основного зеркала 5. Светоделитель выполнен в виде кубика 10, составленного из двух прямоугольных призм. Интерферометр содержит два канала – монохроматического излучения и “белого света”, источниками для которых служит гелий-неоновый лазер и лампа накаливания 7. Приемниками служат кремниевый 11 и германиевый 12 фотодиоды. Управление двигателем осуществляется через усилитель привода 16 посредством синхронизатора 15 и блока логики 14 по сигналам каналов монохроматического и “белого” излучения, сформированных блоком 13.

В бортовом ФС HIRIS кроме основного интерферометра имеются два автономных контрольных интерферометра с полупроводниковым лазером на основе арсенида галлия в качестве источника монохроматического излучения в одном и “белого” света – в другом. Это хотя и

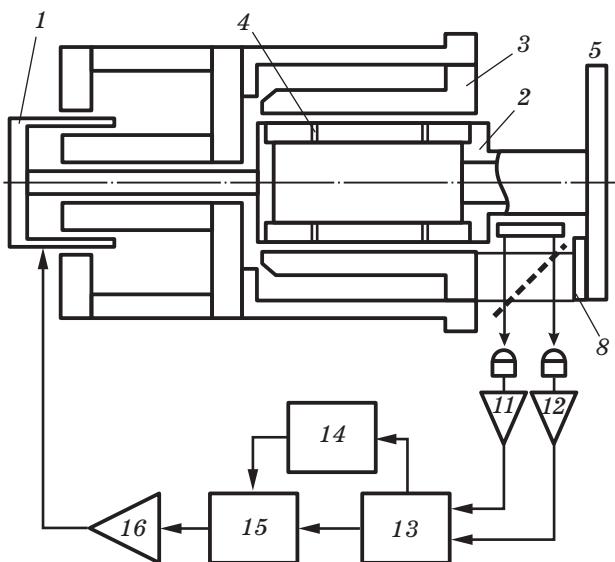


Рис. 8. Блок-схема системы сканирования Фурье-спектрометра с пневмоподшипником FTS-15 DIGILAB (США).

усложняет конструкцию прибора, но зато полностью исключает взаимное влияние каналов. Зеркала интерферометров этого типа установлены на подвижной части подшипника.

В устройстве стабилизации скорости перемещения зеркала впервые в практике ФС применен процессор.

Особое место среди электродинамических систем занимает система, у которой перемещение зеркала осуществляется с помощью пьезокерамики [23]. Достоинством этой системы является прецизионное позиционирование зеркала интерферометра при его малых перемещениях.

Сравнительный анализ систем сканирования

В табл. 1 и 2 приведены основные характеристики систем сканирования ФС. Анализируя приведенные в таблицах данные, можно прийти к заключению, что наиболее часто используемыми системами сканирования являются электродинамические системы с пневмоподшипниками. Эти конструкции проникают и в бортовые ФС, условия функционирования которых значительно сложнее, чем условия функционирования лабораторных вариантов ФС.

Дальнейшее развитие систем сканирования ФС идет по пути совершенствования управления процессом сканирования как за счет автоматической компенсации погрешности прямоли-

Таблица 1. Основные параметры электромеханических систем сканирования

Модель, разработчик	Тип		Скорость зеркала, мм/с	Стабильность скорости, %	Наибольшее перемещение зеркала, мм
	преобразователя	устройства стабилизации			
FTS, Steward Observatory, США	винтовой	индукционное	0,3	1,0	50
ИТ-106, ГОИ, СССР	кулачковый	—	0,2	3 – 7	0,5
DA3.02 ВВ, Вомет, Канада	ленточный	индукционное и интерференционное	0,1 – 30	±10	130
MI for the 91 sm Teles C., NASA, США	винтовой	интерференционное	2,0	1,0	150

Таблица 2. Основные параметры электродинамических систем сканирования

Модель, разработчик	Тип		Скорость перемещения зеркала, мм/с	Стабильность скорости, %	Наибольшее перемещение зеркала, мм
	преобразователя	устройства стабилизации			
IRIS-B NASA, США	мембрана	индукционное и интерференционное	0,184	1,0	2,0
IRIS-D			0,275		3,6
IRIS-M			0,235		4,27
I-6T, BLOCK ASS., США	мембрана	то же	0,19		0,19
FT-02, FT-10 LUMEX, Россия	параллелограмм	индукционное	1,0	2,5	1,0
ФСР МГТУ, Россия	параллелограмм	интерференционное	1,5		1,5
АОСТ Россия, Франция	маятниковый	интерференционное	1,1		2,8
FTS-10, DIGILAB, США	пневмоподшипник	интерференционное	2,5		2,5
FTS-12, DIGILAB, США	гидроподшипник	интерференционное	3,1		1,25
FTS-14,15,16 FTS-20 DIGILAB, США	пневмоподшипник	интерференционное	1,5 1,5	1,0	10 40
7000, NICOLET INST	пневмоподшипник	интерференционное	0,5–56,0	±0,5	80
IFS-115 BRUKER, ФРГ	пневмоподшипник		0,8–40	±0,3	0,3–0,8
MIR-20 POLYTEK, ФРГ MIR-30 MIR-160		интерференционное	0,1–100 2,5–40 0,2–40		12 10 85
600, BLOCK ENG. США 610 620 197A 197/RS I-8 296 C	пневмоподшипник	интерференционное	64 скан/с 8 скан/с 64 скан/с 25,3 100 скан/с 10 скан/с 16 скан/с	10	1,25 0,6 10 10 0,25 0,25 10
IF-3, IDEALAB, США	подшипник	интерференционное	100 скан/с		10
SI-1, АКАДЕМИЯ НАУК, ГДР	подшипник	индукционное и интерференционное	0,3	± 3	2
HIRIS, HOMYWELL RADIATION CENTER, США	подшипник	интерференционное	5,5		5,5

нейности перемещения оптических элементов конструкции, так и за счет широкого применения цифровых устройств, микропроцессоров и компьютерной техники.

Достигнутый в настоящее время уровень разработки электродинамических двигателей и направляющих с пневмоподшипниками в основном удовлетворяет требованиям современных ФС. В дальнейшем представляется целесообразным осуществление перехода к использованию направляющих с магнитным подвесом [22], которые полностью исключают необходимость использования смазывающих сред. Возможность совмещения функции магнитного подвеса и линейного двигателя в одном устройстве может привести к существенному упрощению всей конструкции ФС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мерц Л.* Интегральные преобразования в оптике. М.: Мир, 1969. 182 с.
2. *Белл Р.Дж.* Введение в фурье-спектроскопию. Пер. с англ. / Под ред. Жижина Г.Н. М., 1975. 380 с.
3. *Архипов В.В.* Аподизирующее действие на аппаратную функцию двухлучевого интерферометра погрешности прямолинейности сканирования // Оптический журнал. Т. 76. № 6. С. 31–33.
4. *Thompson R.I.* A Motor-Micrometer-Driver Infrared Fourier-Transform Spectrometer // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1975. V. 87. № 520. P. 929–931.
5. *Андреев А.И., Горбунов Г.Г., Киселев Б.А.* Особенности конструкции быстросканирующего фурье-спектрометра // ОМП. 1972. № 3. С. 23–26.
6. *Горбунов Г.Г., Киселев Б.А.* Исследование характеристик быстросканирующего фурье-спектрометра // ОМП. 1972. № 11. С. 14–17.
7. *Жижин Г.Н.* Современная фурье-спектроскопия. Аппаратура и применения. Троицк. 1977. Препринт № 19.
8. *Hanel R.A.* The Nimbus 3 Michelson Interferometer // Appl. Opt. 1970. V. 9. № 8. P. 1767–1774.
9. *Hanel R.A.* The Nimbus 4 Michelson Interferometer // Appl. Opt. 1971. V. 10. № 6. P. 1376–1382.
10. *Hanel R.A.* Mariner 9. Michelson Interferometer // Appl. Opt. 1972. V. 11. № 11. P. 1376–1382.
11. *Архипов В.В., Ежевская Т.Б.* Малогабаритный интерферометр для фурье-спектрометрии // ОМП. 1982. № 9. С. 31–33.
12. *Block L.C., Zachor A.S.* Inflight Satellite Measurements of Infrared Spectral Radiance of the Earth // Appl. Opt. 1964. V. 3. № 2. P. 209–214.
13. *Дворук С.К., Корниенко В.Н., Кочиков И.В., Лельков М.В., Морозов А.Н., Позднышев М.Л., Светличный С.И., Табалин С.Е.* Портативный фурье-спектрорадиометр с неохлаждаемым фотоприемником // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 11. С. 67–72.
14. *Морозов А.Н., Светличный С.И.* Основы фурье-спектрорадиометрии. М.: Наука, 2006. 276 с.
15. *Nichols G.B.* Apparatus for Controlling the Velocity of an Electromechanic Drive for Interferometer and the Like // Patent USA № 3488123. 1970.
16. *Архипов В.В., Шаров Е.М.* Интерферометрическая система сканирования // А. с. СССР № 524074. 1976.
17. *Griffiths P.R.* Rapid-scan Infrared Fourier Transform Spectroscopy // Preprinted from Applied Spectroscopy Reviews. 1972. № 6 (1). P. 31–33.
18. *Milward R.C.* Recent Advances in Commercial Fourier Spectrometers for the Submillimeter Wavelength Region // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1974. V. 22. № 12. P. 1018–1021.
19. *Weinberg J.M.* Field Measurements Utilizing Fourier Spectroscopy // Japanese Journal of Applied Physics. 1975. V. 14. Suppl. № 11. P. 71–76.
20. *Kempe V.* Infrarot-Fourierspectrometer SI-1 auf Meteor-25 // Radio Fernsehen Elektronik. 1977. V. 26. № 19. P. 627–630.
21. *Ridgway S.T., Capps R.W.* A Fourier Transform Spectrophotometer for Astronomical Applications 700–1000 cm // Review of Scientific Instrument. 1974. V. 45. № 5. P. 676–679.
22. *Кацнельсон О.Г., Эдельштейн А.С.* Магнитная подвеска в приборостроении. М.: Энергия. 1966. 201 с.
23. *Parshe H., Luchner K.* Ein laserkontrolliertes Fourier-interferometer fur den sichtbaren Spectralbereich // Optik. 1973. Band 38. Heft 3. P. 298–310.
24. *Кораблев О.И., Григорьев А.В., Монмесан Ф., Мощкин Б.Е., Пацаев Д.Е., Макаров В.С., Максименко С.В., Гречнев К.В., Котлов В.И., Засова Л.В., Шакун А.В., Федорова А.А., Терентьев А.И., Экономов А.П., Хатунцев И.В., Майоров Б.С., Никольский Ю.В., Маслов И.А., Гвоздев А.Б., Кузьмин Р.О.* Миниатюрный фурье спектрометр “АОСТ” для космических исследований // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 2. С. 28–35.