

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 629.198.3 + 543.422

МНОГОЦЕЛЕВОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ)

© 2012 г. Б. Е. Мошкин, В. А. Вагин*, А. В. Жарков, С. В. Максименко, Ю. П. Мацицкий,
А. С. Романовский**, А. И. Хорохорин*, М. А. Шилов***

*Институт космических исследований РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*

**Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
Россия, Москва*

***Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, Москва*

****ФГУП “Главкосмос”, Россия, Москва*

E-mail: bmoshkin@mtu-net.ru, maximenko@iki.rssi.ru, vague@mail.ru

Поступила в редакцию 11.11.2011 г.
После доработки 10.01.2012 г.

Описан экспериментальный образец многоцелевого фурье-спектрометра МЦФС, предназначенного для дистанционного зондирования Земли. Интерферометр спектрометра выполнен по схеме “двойного маятника” и имеет уголкового отражатели с апертурой 2.5 дюйма. В качестве приемников излучения используются криогенная КРТ-матрица 4×4 и пироэлектрик. Прибор оснащен системой сканирования поперек трассы полета с компенсацией смазывания изображения, вызванного движением космического аппарата.

Фурье-спектрометры уже более 40 лет используются на борту космических аппаратов для решения широкого круга научных и прикладных задач: исследования планет солнечной системы [1–3], измерения температурного профиля и малых газовых компонент земной атмосферы [4]. Создание каждого бортового фурье-спектрометра представляет собой сложную техническую задачу, связанную в основном с высокими требованиями, предъявляемыми к качеству изготовления прибора и стабильности его характеристик. В каждом конкретном случае разработчикам заново приходится решать эти задачи.

В настоящее время в составе космического аппарата “Метеор-М” № 2 готовится к полету первый отечественный фурье-спектрометр ИКФС-2, предназначенный для измерений параметров атмосферы для метеорологии [5]. Однако уже во время изготовления этого прибора началась разработка усовершенствованного многоцелевого фурье-спектрометра МЦФС, основанного на интерферометре Майкельсона в варианте “двойной маятник”. Он отличается от существующих приборов такого класса рядом особенностей, в частности:

– возможностью выбора спектрального диапазона, что позволяет расширить круг задач, решаемых прибором;

– использованием многоэлементного приемника 4×4 (16 приемных площадок), позволяюще-

го исключить влияние облаков, случайно попадающих в поле зрения отдельного элемента, а также повысить отношение сигнал/шум при усреднении результатов измерения; повышение пространственного разрешения требуется также для решения задач, связанных с измерением спектров земной поверхности, и для проведения картирующей спектрометрии высокого спектрального разрешения, что можно также использовать при геофизических исследованиях малых газовых компонент;

– возможностью программного изменения спектрального разрешения в диапазоне $0.25\text{--}5\text{ см}^{-1}$ и десятикратного изменения скорости качания маятника; выбор для каждой научной задачи оптимальных значений этих параметров способствует уменьшению объема передаваемой информации, увеличению числа наблюдаемых объектов, повышению отношения сигнал/шум в получаемом спектре;

– системой сканирования поперек трассы полета, снабженной узлом компенсации смазывания изображения, обеспечивающим продолжительное удерживание поля зрения прибора на выбранной точке.

Все эти меры необходимы для эффективного перенацеливания на решение той или иной геофизической или какой-либо прикладной задачи.

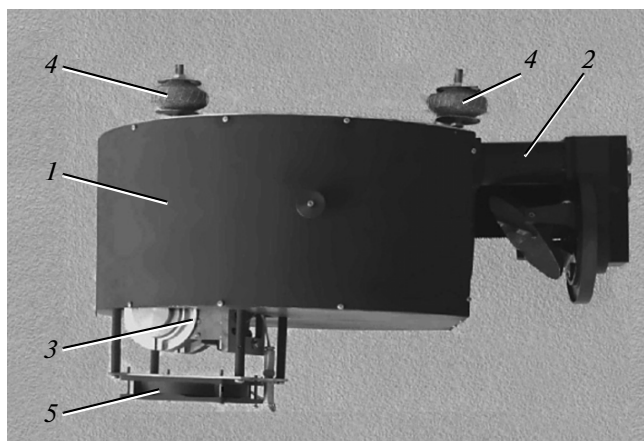


Рис. 1. Спектрометр и сканер. 1 – спектрометр; 2 – сканер со снятым кожухом; 3 – компрессор криогенной машины; 4 – виброизолятор; 5 – вентилятор охлаждения компрессора.

При разработке конструкции прибора искались технические решения, приводящие к снижению массы прибора.

На первом этапе работы был изготовлен и испытан экспериментальный образец МЦС-Э, на котором отработаны основные новые элементы и технические решения. Экспериментальный образец имеет следующие основные характеристики:

- два спектральных канала: длинноволновый 2.5–25 мкм (одноэлементный пироэлектрический приемник) и средневолновый 5–15 мкм (16-элементный КРТ-приемник в виде матрицы 4 × 4, охлаждаемой до температуры жидкого азота);

- поле зрения одноэлементного приемника 0.033 мрад, матричного приемника – 0.05 мрад при поле зрения каждого элемента 0.01 мрад;

- спектральное разрешение, программно устанавливаемое в интервале 0.25–5 см⁻¹ (максимальная оптическая разность хода от 4 до 0.2 см);

- скорость качания маятника интерферометра может быть выбрана в пределах, соответствующих диапазону частот референтного канала 9.2–90 кГц, время записи двухсторонней интерферограммы – в интервале 0.5–10 с;

- система наведения (сканер) обеспечивает поворот оси поля зрения прибора на заранее заданные углы в интервале 0°–63° в обе стороны от трассы спутника в заранее заданной последовательности, а также на космос и на калибровочный инфракрасный излучатель;

- сканер обеспечивает компенсацию смазывания изображения, вызванного движением прибора по орбите, в пределах ±7°;

- для калибровки спектро-радиометра используется излучатель типа “черное тело” со встроенным нагревателем мощностью 10 Вт;

- масса экспериментального образца составляет 24 кг.

Летный образец прибора будет представлять собой моноблок из двух жестко связанных модулей: фурье-спектрометра и однозеркальной системы наведения – сканера. В экспериментальном образце, назначение которого – проверить основные конструктивные решения, электронные узлы управления спектрометром и сканером выполнены в виде отдельных модулей, упрощены некоторые непринципиальные технические решения. Кроме того, на этапе первых экспериментов малогабаритная криогенная машина была заменена на более тяжелую и громоздкую с отдельным блоком управления.

Спектрометр со сканером показаны на рис. 1.

Корпус спектрометра имеет форму усеченного цилиндра диаметром 480 мм, шириной 415 мм и высотой 210 мм. На плоской лицевой панели, сопряженной с цилиндрической обечайкой, расположено входное окно и блок электрических разъемов. На этой же панели закреплен сканер. Вся сборка подвешивается на четырех амортизаторах ДКУ-54-7.5/15 [6]. Габариты спектрометра со сканером с учетом амортизаторов и выступающего вентилятора криогенного холодильника составляют 600 × 480 × 360 мм.

Оптическая схема спектрометра изображена на рис. 2.

Излучение, идущее от объекта наблюдения, направляется зеркалом сканера через окно спектрометра 1 в интерферометр, содержащий светоделительную пластину 2, компенсаторную пластину 3 и два уголковых отражателя 4 и 5.

Излучение, модулированное в интерферометре, падает на поворотное зеркало 6, направляющее поток излучения или на однозеркальный объектив 7, в фокусе которого находится пироэлектрический приемник 8, или на объектив 9, в фокусе которого за германиевым окном 10 установлена КРТ-матрица 11.

В референтном канале излучение от твердотельного лазера поступает в интерферометр по оптоволоконному световоду через коллиматорную линзу 12. Пучок излучения после прохождения через интерферометр фокусируется линзами 13 и 14 на фотоприемниках 15 и 16.

Основные элементы спектрометра можно видеть на рис. 3. Центральное положение занимает интерферометр 1. Излучение к нему попадает через входное окно 2. С противоположных сторон от поворотного зеркала 3 расположены криогенная машина с матричным приемником 4 и радиометр длинноволнового канала 5.

Ниже описаны характерные особенности отдельных узлов прибора.

Интерферометр является основной частью спектрометра. Все основные узлы интерферометра

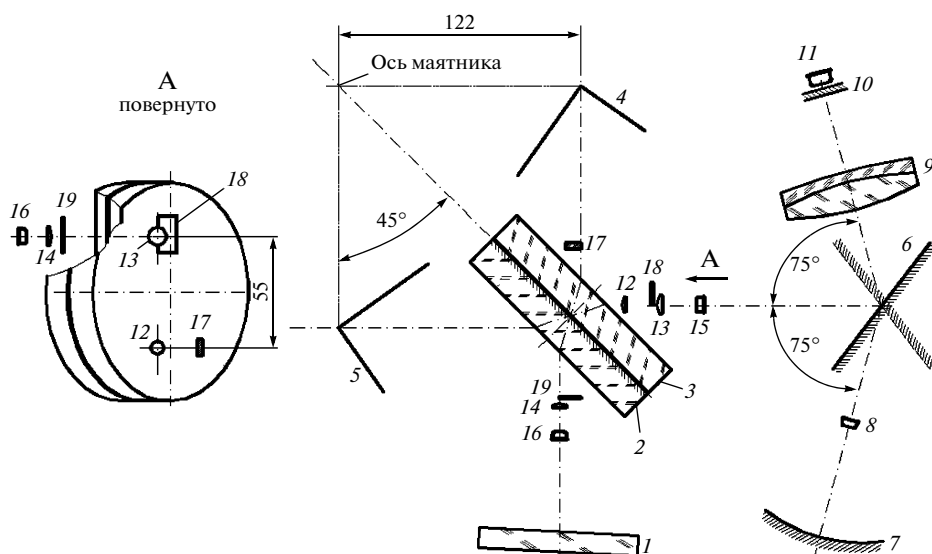


Рис. 2. Оптическая схема спектрометра. 1 — окно; 2 — светоделительная пластина; 3 — компенсаторная пластина; 4, 5 — уголки отражатели; 6 — поворотное зеркало; 7 — однозеркальный объектив; 8 — пироэлектрический приемник; 9 — линзовый объектив; 10 — окно приемника; 11 — КРТ-матрица; 12 — коллиматорная линза; 13, 14 — линзы; 15, 16 — фотоприемники референтного канала; 17 — плоскопараллельная пластинка; 18, 19 — непрозрачные экраны.

установлены на его корпусе, который соединяется с основанием спектрометра через платформу с четырьмя виброизоляторами.

Светоделитель состоит из светоделительной и компенсаторной пластин (диаметр 115 мм, толщина 15 мм) из кристаллического бромида калия. Он установлен в обойме, которая может при юстировке наклоняться относительно корпуса интерферометра с помощью трех ультраточных винтов 9S127BM-25 фирмы STANDA. Для фиксации светоделителя после юстировки оправа приклеивается к трем уголкам, жестко соединенным с корпусом (один из них виден на рис. 3, поз. 18). Надежность такого способа фиксации была подтверждена при виброударных испытаниях.

Маятник, имеющий два уголковых отражателя фирмы PLX (США) с апертурой 2.5 дюйма и электромагнитный привод, опирается на два подшипника Ю1000902, закрепленных в корпусе интерферометра. Максимальный угол поворота маятника равен 4.7° , что обеспечивает при длине плеч маятника 122 мм максимальную оптическую разность хода 40 мм.

Привод (рис. 4) содержит четыре постоянных магнита 1 из материала NdFeV и катушку 3. Магниты закреплены вместе с магнитопроводами 2 на маятнике с обратной стороны от уголковых отражателей на плече 60 мм, частично дополняя функцию противовеса. Катушка 3 вклеена в плоский держатель 4, установленный на кронштейне 5, закрепленном на корпусе интерферометра. Катушка расположена между двумя парами магнитов так, что направления магнитного поля через правую и левую части катушек противоположны

друг другу, как и противоположны направления тока по виткам катушки справа и слева. Поэтому сила Ампера действует на обе части катушки в одну и ту же сторону. При диаметре катушки 34 мм и размере каждого магнита $23 \times 21 \times 4$ мм отношение момента силы к току равно 0.69 Нм/А. Привод такого типа был успешно реализован в космическом фурье-спектрометре АОСТ [7].

Датчики положения. При управлении качанием маятника необходимо отмечать моменты достижения им заранее выбранных крайних положений. Были испытаны два способа. Стандартное решение основано на использовании датчика положения, выдающего сигнал вблизи нулевой разности хода. Нами использовался датчик Холла, который был установлен на небольшой плате (поз. 15 на рис. 3) на корпусе интерферометра, а на рычаге, соединенном с осью маятника, закреплен постоянный магнит. Взаимное расположение этих элементов обеспечивает получение сигнала от датчика вблизи положения нулевой оптической разности хода. Еще два датчика Холла расположены на той же плате в местах, соответствующих предельным положениям маятника. Они являются вспомогательными и используются при включении прибора.

При движении маятника сразу после сигнала от датчика положения ведется счет периодов референтного канала. Количество этих периодов однозначно связано с текущей величиной оптической разности хода. При достижении заранее введенного числа периодов осуществляется программный реверс, для чего прекращается процесс управления и на мотор подается рассчитанный

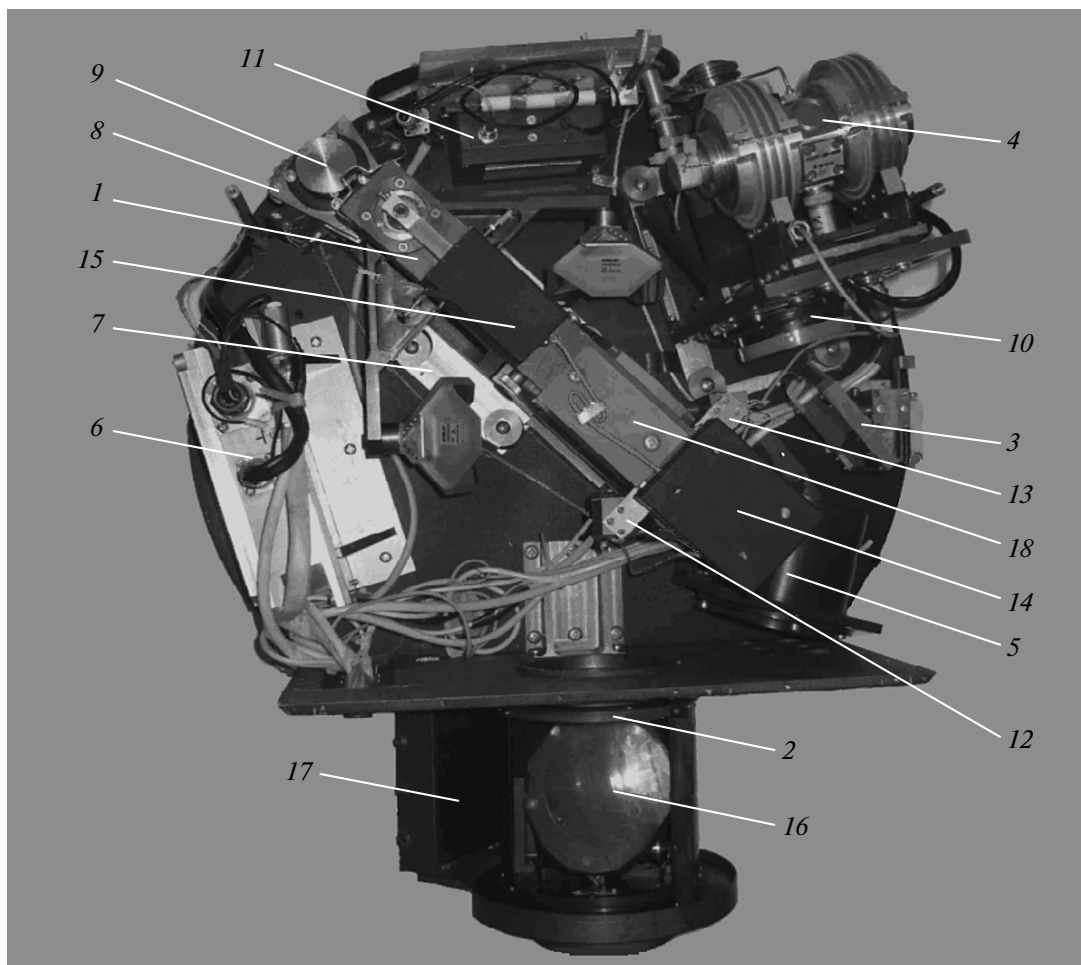


Рис. 3. Спектрометр со снятой крышкой. 1 – интерферометр; 2 – входное окно; 3 – поворотное зеркало; 4 – криогенная машина; 5 – длинноволновый радиометр; 6 – блок управления криогенной машиной; 7 – платформа с амортизаторами; 8 – привод маятника; 9 – противовес; 10 – объектив; 11 – блок лазеров; 12 и 13 – фотоприемники референтного канала; 14 – усилители референтных сигналов; 15 – узел датчиков Холла; 16 – зеркало сканера; 17 – калибровочный излучатель; 18 – элемент фиксации светодетектора.

импульс тока. Спустя некоторое время, за которое маятник должен изменить направление движения и разогнаться до нужной скорости, управление движением возобновляется. Однако именно в это время, когда частота референтного сигнала мала и выходит за нижнюю границу полосы пропускания, работа системы становится крайне неустойчивой. Выход на нужную скорость занимает продолжительное время, иногда до 20% от длительности интерферограммы [8].

На отдельном интерферометре нами был реализован и проверен механический способ осуществления реверса. На валу маятника на плоской стальной пружине был закреплен двухсторонний контакт (так называемый “подвижный контакт”). Качание маятника, происходящее с постоянной угловой скоростью ω , ограничивается с двух сторон двумя неподвижными контактами. В крайних положениях подвижный контакт соприкасается с неподвижными, после соприкоснове-

ния маятник продолжает двигаться по инерции замедленно, передавая свою кинетическую энергию на изгиб пружины. После остановки маятник начинает двигаться ускоренно обратно под действием упругости пружины, и в момент размыкания контактов его скорость опять равна ω . Пока контакты замкнуты, система стабилизации скорости отключена. При размыкании контактов система управления начинает работать, но уже в нужном направлении, при заданной скорости и стабильном референтном сигнале.

Время реверса t при коэффициенте упругости пружины k (отношение момента силы к углу отклонения маятника) и моменте инерции маятника J равно $t = \pi\sqrt{J/k}$, т.е. оно не зависит ни от скорости, ни от амплитуды колебания. Выбирая нужную жесткость пружины, можем задать любое требуемое время реверса, постоянное для любого режима работы интерферометра. В описываемом

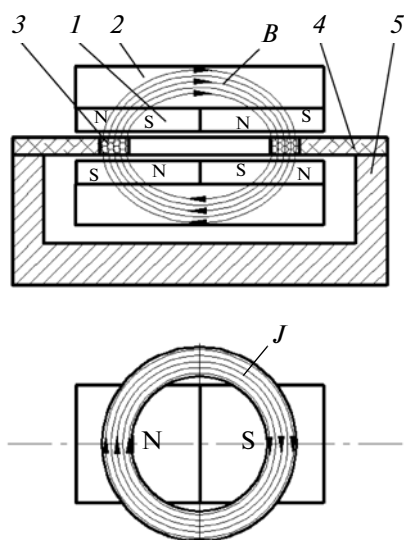


Рис. 4. Схема привода маятника. B — линии магнитной индукции, J — линии тока.

интерферометре, например, при размере плоской пружины $80 \times 20 \times 0.5$ мм время реверса составляет 250 мс. Сила взаимодействия контактов по порядку величины равна 0.1 Н, что лежит в интервале сил, достаточно благоприятном для работы контактов. Регулировка максимальной оптической разности хода достигается механическим перемещением неподвижных контактов.

В штатных образцах приборов число срабатываний за 10 лет непрерывной работы составит порядка $3 \cdot 10^8$. Несмотря на грандиозность этого числа, такой ресурс контактов вполне реален.

В референтном канале источниками излучения являются два лазерных диода с распределенной обратной связью [9] (один — рабочий, другой — резервный) с длиной волны 1.31 мкм при мощности 1.5 мВт, установленные в отдельном блоке (поз. 11 на рис. 3). Их излучение передается по Y-световоду в коллиматор, который формирует параллельный пучок диаметром 5 мм. Между лазерным модулем и световодом установлен двухстадийный поляризационно-независимый световой изолятор. Он обеспечивает устойчивость референтного сигнала к расположению световода. Для предварительной юстировки референтного канала световод с коллиматором подсоединяется к лазеру, излучающему видимый свет на длине волны 0.65 мкм. В обоих приемных узлах находятся собирающие линзы и германиевые фотоприемники ФД9Э-111А (соответственно позиции 13, 14, 15 и 16 на рис. 2).

Чтобы успешно управлять движением маятника, необходимо постоянно иметь информацию о направлении его движения. Для этого, как известно [7, 8], можно использовать два синхронных референтных канала, в которых фазы сигнала

лов взаимно сдвинуты на $\pi/2$, а в более общем случае — на $2\pi n + \pi/2$, где n — произвольное целое число [10]. С этой целью в пучок лазерного излучения, вышедшего из коллиматорной линзы 12 (см. рис. 2) и отраженного от светоделителя к уголкового отражателю 4, введена стеклянная плоскопараллельная пластинка 17 толщиной $h = 3$ мм, перекрывающая по диаметру половину пучка. Эта пластинка создает некоторую разность фаз излучения в обеих половинах этого пучка. Полученный таким образом сдвоенный пучок вторично проходит через светоделитель, после которого часть его отражается к приемнику 15, а другая часть проходит к приемнику 16. В обеих ветвях оба сдвоенных пучка интерферируют с лазерным излучением, исходно *прошедшим* через светоделитель и уголкового отражателя 5. С помощью непрозрачных экранов 18 и 19 на приемник 15 подается излучение той части сдвоенного пучка, которая прошла через пластинку 17, а на приемник 16 — той части, что миновала эту пластинку.

Стеклянную пластинку можно наклонять на небольшой угол α , тем самым изменяя оптическую толщину для проходящих лучей на величину δ , равную

$$\delta = h\alpha^2 \frac{(n-1)}{2n},$$

где h — толщина пластины, n — ее показатель преломления.

При длине волны лазера 1.31 мкм и толщине стеклянной пластинки 3 мм требуемая разность хода $\delta = \lambda/4$ (что соответствует разности фаз $\pi/2$) достигается наклоном пластинки на угол $\alpha = 0.025$ рад, т.е. 1.5° . Стеклянная пластинка 17 закреплена на рычаге, который поворачивается вокруг вертикальной оси с помощью микрометрического винта. Аналогичная конструкция описана в [10]. Нужное положение пластинки выбирается при регистрации обоих референтных каналов на двухлучевом осциллографе.

Матричное фотоприемное устройство. В приборе МЦФС-Э используется фотодиодная матрица 4×4 из тройного сплава Hg-Cd-Te, работающая при температуре 78 К. Размер каждого пикселя 0.65×0.65 мм при расстояниях между центрами 0.8 мм. Максимум чувствительности находится при 13.5 мкм, диапазон по уровню 0.5 составляет 7.5–15 мкм. Матрица установлена в криостате на холодном пальце микрокриогенной системы МСМГ-3В-1/80 производства МТК «Криогенная техника». В едином блоке с криостатом смонтированы 16 предварительных усилителей. Кронштейн, несущий фотоприемное устройство, соединяется с основанием прибора через виброизолирующие шайбы.

Изображение на матрице строится разработанным в Государственном оптическом институте для данного прибора объективом (поз. 10 на рис. 3).

Он содержит две линзы: первая — из германия, вторая — из селенида цинка. Основной спектральный диапазон составляет 5–15 мкм. Фокусное расстояние для этого диапазона равно 63 мм, световой диаметр 57 мм. Линейный размер поля зрения в фокальной плоскости составляет 4 мм. Спектральное пропускание в области 5–14 мкм лежит в пределах 75–85%, спадая до 60% при 15 мкм. Пространственное разрешение (ширина функции рассеяния линии на половине высоты) для всего поля зрения не превышает 40 мкм. В диапазоне 2.5–5 мкм, который является вспомогательным, пространственное разрешение ухудшается, достигая 1 мм при 2.5 мкм. Толщина объектива составляет 23 мм.

Длинноволновое фотоприемное устройство (поз. 5 на рис. 3) выполнено в виде автономного узла. На цилиндрическом корпусе закреплено сферическое зеркало диаметром 60 мм с радиусом кривизны 120 мм, а перед ним установлен пироэлектрический фотоприемник P5449 фирмы VAE Systems с размером приемной площадки 2 мм, обеспечивающим поле зрения 0.033 рад. Плата усилителя расположена на кронштейне, соединяющем корпус с основанием прибора.

Входное окно изготовлено из пластины бромида калия. Диаметр пластины 85 мм при световом диаметре 77 мм, толщина 8 мм. Особенность установки окна состоит в том, что его плоскость повернута на небольшой угол (примерно 2°) относительно оптической оси спектрометра. Это необходимо для исключения “духов”, т.е. деталей в спектре, возникающих в фурье-спектрометрах при интерференции двух пучков излучения: внешнего, прошедшего через окно, и отраженного от окна обратного излучения интерферометра.

Сканер предназначен для наведения поля зрения прибора поперек трассы полета на объекты наблюдения, а также и на объекты калибровки. Для калибровки используются излучатель инфракрасного излучения и космос — область пространства, свободная от источников инфракрасного излучения.

Диагональное зеркало сканера, имеющее форму эллипса размером 130 × 88 мм, наклонено к входной оптической оси под углом 45° и может поворачиваться вокруг этой оси на угол 205°. Входная оптическая ось совпадает по направлению с вектором скорости космического аппарата. Предусмотрено непрерывное отслеживание отдельных объектов в течение до 10 с для более подробного их изучения, для чего имеется возможность наклона зеркала на полный угол до 7°, т.е. перемещения поля зрения на ±7°. Вращение и качание зеркала осуществляются шаговыми двигателями Phitron VSS 42 и Phitron VSS 19 через зубчатые передачи с редукцией 1:5 и 1:14 соответственно. Угол поворота зеркала сканера измеряется 10-разрядным энкодером AS5040 фирмы Austriamicro-

systems, что позволяет контролировать угол с точностью 0.35°.

Для обеспечения быстрого и плавного вращения зеркала применяется адаптивный режим управления шаговым двигателем. Для этого на валу двигателя установлен 12-разрядный энкодер AS5045, который позволяет контролировать положение вала с точностью 0.09°. Электронный блок, анализируя текущее положение ротора мотора, осуществляет переключение обмоток двигателя с некоторым опережением или запаздыванием в зависимости от того, начинается поворот зеркала или заканчивается. Величина угла опережения или угла запаздывания определяется экспериментально.

При проведении экспериментов при различных значениях этого угла, а также при разных величинах тока через обмотки мотора было выбрано оптимальное опережение, близкое к 0.85 от величины шага мотора. При этом скорость вращения зеркала почти не зависит от напряжения, даже при его уменьшении почти в два раза, составляя почти точно 360°/с. Следует отметить, что при работе в пошаговом режиме при номинальном токе скорость вращения не превышает 45°/с.

Задачи обработки сигналов и управления в экспериментальном образце выполняет отдельный модуль управления сканером, построенный на основе одноплатного компьютера с интерфейсом I2C для связи с энкодерами, интерфейсом COM для связи с основным компьютером МЦФС и оснащенный силовой электроникой для управления обмотками шаговых моторов.

Калибровочный излучатель является наборным, состоит из 32 одинаковых заостренных пластин размером 102 × 18 × 3 мм, выполненных из алюминиевого сплава Д16т. Поверхности пластин анодируются и покрываются черным лаком Aeroglaze Z-306, имеющим высокую степень черноты, 0.95. Более подробно такой излучатель описан в [11]. В отверстиях внутри тела излучателя установлены два датчика температуры, а на заднюю поверхность излучателя наложен пленочный электронагреватель. Излучатель помещен в толстостенный теплоизолированный снаружи кожух, выравнивающий тепловое поле и защищающий поверхность излучателя от внешних засветок. При калибровке прибора зеркало сканера направляется на излучатель, который при этом изолируется от окружающего внешнего пространства непрозрачным экраном, соединенным с зеркалом.

Система управления и обработки сигналов (с.у.о.с.) предназначена для выполнения следующих основных функций:

— управления перемещением триэдров и поддержания скорости перемещения с заданной точностью (среднеквадратичное отклонение скорости

от номинальной $\leq 0.05\%$ при отсутствии внешних механических воздействий);

– программирования скорости движения триэдров в диапазоне 3–30 мм/с;

– получения интерферограммы с одноэлементного пироприемника и вычисления спектра;

– получения интерферограмм с элементов матричного фотоприемника, их предварительной обработки и вычисления спектров;

– формирования пакета телеметрической информации и передачи его в персональную электронную вычислительную машину (п.э.в.м.).

В с.у.о.с. заложены элементы, предназначенные для управления такими узлами прибора, как микрокриогенная система, сканер, оптический переключатель каналов, арретир и система терморегулирования, что будет использоваться при дальнейшем развитии экспериментального образца.

Система управления и обработки сигналов подключается к п.э.в.м. по интерфейсу Ethernet с пропускной способностью 100 Мбит/с. П.э.в.м. осуществляет загрузку программного обеспечения в с.у.о.с. и передачу параметров работы всего прибора (скорости перемещения триэдров, выбор диапазона, задание температуры для систем терморегулирования и т.п.). В п.э.в.м. передаются для отображения на мониторе интерферограммы, спектры, графики скоростей, телеметрическая и диагностическая информация.

Система управления и обработки сигналов состоит из четырех модулей: модуля источников питания, модуля центрального процессора, модуля управления двигателями и модуля аналого-цифровых преобразователей (а.ц.п.). Модуль центрального процессора реализован на цифровом сигнальном процессоре фирмы Texas Instruments TMS320DM642, а в качестве вычислительного и управляющего ядра модуля управления двигателями использован цифровой сигнальный процессор TMS320C2811. В качестве а.ц.п. использованы 24-разрядные сигма-дельта а.ц.п. фирмы Analog Devices AD7766. Модули объединены интерфейсом, обеспечивающим передачу данных и специальных сигналов управления между модулями.

Модули собраны на четырех печатных платах, каждая размером 160 × 100 мм.

Описанный экспериментальный образец фурье-спектрометра использовался для записи в лабораторных условиях спектров поглощения воздуха при различных режимах прибора. Результаты исследования работы прибора и анализ полученных спектров позволили выбрать оптимальные технические решения для разработки летного варианта прибора.

В заключение выражаем свою искреннюю благодарность и признательность Александру Валерьевичу Петрову, активная деятельность которого способствовала становлению, проведению и успешному завершению работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов Г.Г., Мошкин Б.Е. // Оптический журнал. 2000. № 5. С. 69.
2. Эртель Д., Мороз В.И., Нопираковский И. и др. // Космич. исслед. 1985. Т. 23. С. 191.
3. Formisano V., Angrilli F., Arnold G. et al. // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 963.
4. Glumb R., Jordan D., Predina J. // Int. Symp. on Optical Sci. and Techn. "The Crosstrack Infrared Sounder". SPIE 2000. CA. San Diego, July 2000. P. 4131.
5. Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Городецкий А.К. и др. // Всероссийская конференция "Дистанционное зондирование Земли из космоса". М.: ИКИ РАН, 2007. С. 35.
6. Чегодаев Д.Е., Мулюкин О.П., Колтыгин Е.В. Конструирование рабочих органов машин и оборудования из упругопористого материала МР: Учеб.-справ. пособие. Ч. II. Самара: НПЦ "Авиатор", 1994.
7. Кораблев О.И., Григорьев А.В., Мошкин Б.Е. и др. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 2. С. 28.
8. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-спектрорадиометрии. М.: Наука, 2006.
9. Васильев М.Г., Васильев А.М., Шелякин А.А. // Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 9. С. 1031.
10. Мошкин Б.Е., Максименко С.В., Шакун А.В. // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 6. С. 51.
11. Мошкин Б.Е., Максименко С.В., Балашов А.А. и др. // ПТЭ. 2010. № 5. С. 154.