

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.6.08 + 520.844 + 520.34 + 520.364 + 53.082.54 + 535.417.22

ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ РАБОТЫ НА МАРСЕ

© 2019 г. **Б. Е. Мошкин^а, И. А. Маслов^а, О. В. Сазонов^а, И. А. Ступин^{а,*}**

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

**e-mail: s2pin@rambler.ru*

Поступила в редакцию 09.06.2018 г.

После доработки 04.07.2018 г.

Принята к публикации 30.07.2018 г.

Описаны конструкция, принцип действия и результаты испытания фурье-спектрометра, предназначенного для изучения состава марсианской атмосферы методом просвечивания. Штатный образец прибора должен работать на посадочной платформе после посадки на Марс. Спектральный диапазон изготовленного образца 0.5–4 мкм, спектральное разрешение 0.04 см^{-1} , апертура 25 мм, масса 1.1 кг.

DOI: 10.1134/S0032816219020149

Международная программа “ЭкзоМарс” предусматривает на одном из своих этапов мягкую посадку на Марс спускаемого аппарата с марсоходом и рядом приборов, установленных на посадочной платформе, в том числе инфракрасный фурье-спектрометр, который должен измерять спектры излучения Солнца, прошедшего через толщину марсианской атмосферы, и тепловые спектры излучения атмосферы.

В настоящее время исследование марсианской атмосферы производится с борта европейского космического аппарата TGO российским спектральным комплексом ACS [1] и бельгийским прибором NAMAD. В состав комплекса ACS входит фурье-спектрометр ТИРВИМ, успешно работающий на круговой орбите вокруг Марса [2]. На поверхности Марса уже работал фурье-спектрометр Mini-TES [3] в составе марсохода Opportunity. Он обладал спектральным разрешением 10 см^{-1} и был предназначен для исследования грунта в спектральном диапазоне 5–29 мкм. Теоретические модели приводят к требованиям при спектральных исследованиях атмосферы обеспечить в спектральном интервале от 2 до 15 мкм достаточно высокое разрешение — не хуже 0.05 см^{-1} . Но масса всего прибора вместе с системой навигации [4] не должна превышать 4 кг.

Ниже описан опытный образец фурье-спектрометра.

КОНСТРУКЦИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА

Схема оптико-механического блока приведена на рис. 1. Основной узел каждого фурье-спек-

трометра — интерферометр. В данном приборе применен интерферометр Майкельсона [5, 6], состоящий из светоделителя (1, 2) и двух отражателей (3, 4), или ретрорефлекторов: неподвижного (3), используемого для юстировки интерферометра, и подвижного (4),двигающегося вдоль оптической оси. Выходящее из интерферометра излучение плоским зеркалом 5 направляется в объектив 6, в фокусе которого находится пироэлектрический приемник 7, светочувствительная площадка которого имеет диаметр 2 мм.

Пластины светоделителя 1 и 2 диаметром 50 и толщиной 8 мм выполнены из кварца КИ; светоделительное покрытие нанесено на пластину 1. Светоделитель данного образца предназначен для видимой и инфракрасной областей спектра до 4 мкм. В этом заключается основное отличие от проектируемого летного образца, у которого светоделитель должен быть изготовлен из бромида калия и работать в интервале 1.9–17 мкм. Остальные оптические элементы данного образца соответствуют штатному прибору. В качестве ретрорефлекторов используются полые уголкового отражатели Ø25 мм фирмы PLX. Объектив 6 выполнен из селенида цинка, имеет форму мениска с радиусами поверхностей 40 и 120 мм при световом диаметре 27 мм.

Для равномерного движения отражателя 4 применена двухступенчатая схема стабилизации скорости движения. Первая ступень — это направляющая 8 (HIWIN KK40 Technologies Corp), снабженная ходовым винтом 9 с шагом 1 мм. Для вращения винта используется двигатель постоянного тока таход А-тах 12 (10) с понижающим

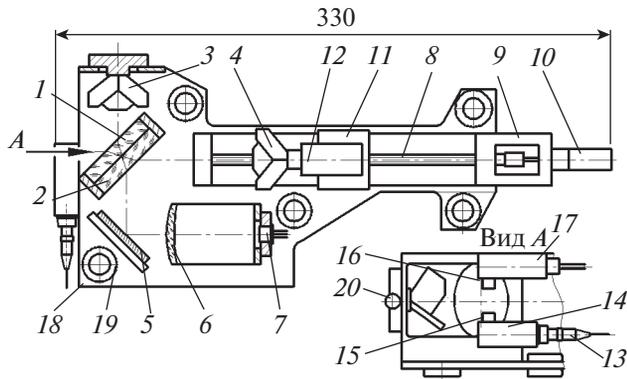


Рис. 1. Схема оптико-механического блока. 1 – светоделительная пластина; 2 – компенсаторная пластина; 3 – неподвижный отражатель; 4 – подвижный отражатель; 5 – плоское зеркало; 6 – объектив; 7 – пироэлектрический фотоприемник; 8 – ходовой винт; 9 – направляющая; 10 – мотор с редуктором; 11 – каретка; 12 – механизм подстройки скорости; 13 – разъем световода; 14 – коллиматор; 15 – призма коллиматора; 16 – призма приемника опорного канала; 17 – приемник опорного канала; 18 – основание; 19 – виброизолятор; 20 – микрометрический винт.

200-кратным редуктором тахоп GS 12 А. Эта система обеспечивает строго прямолинейное перемещение каретки 11, скользящей со скоростью 0.25 мм/с на пути 104 мм. На каретке расположена вторая ступень 12 – механизм подстройки скорости с установленным на нем отражателем 4. Назначение этого механизма – обеспечение при движении постоянство скорости изменения оптической разности хода. Его схема приведена на рис. 2.

Он представляет собой пружинный параллелограмм, установленный основанием 1 на каретке, а сверху на подвижной платформе 2 закреплен отражатель. Боковые стороны 3 и 4 выполнены из пружинной стали толщиной 0.13 мм и шириной 10 мм. Коэффициент упругости обеих пружин равен 0.6 Н/мм. На основании 1 закреплена катушка 5 диаметром 26 мм, имеющая 240 витков медной проволоки $\varnothing 0.2$ мм. На верхней платформе на двух магнитопроводах 6 установлены четыре магнита 7 из сплава неодим-железо-бор размером $15 \times 8 \times 2$ мм. Магниты обращены друг к другу разноименными полюсами. Правая и левая части катушки находятся в зазоре между магнитами, и при протекании тока в катушке на правые и левые пары магнитов действуют одинаково направленные силы. Удельное усилие равно 1.56 Н/А. Масса подвижной части вместе с отражателем достаточно мала, всего 50 г. Это позволяет компенсировать существенно более высокочастотные отклонения скорости изменения оптической разности хода,

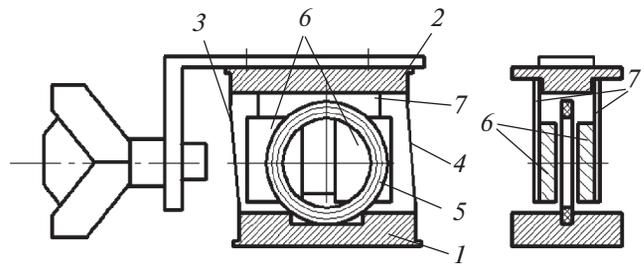


Рис. 2. Механизм подстройки скорости. 1 – основание; 2 – подвижная платформа; 3 – пружина передняя; 4 – пружина задняя; 5 – катушка; 6 – магниты; 7 – магнитопроводы.

чем в интерферометрах типа “двойной маятник” [2] или в интерферометре с одноступенчатым механизмом линейного перемещения, но со значительно более мощным и массивным электромагнитным приводом [7]. Малая масса подвижной части позволяет работать на Марсе даже при большом отклонении направляющей от горизонтального положения.

Для стабилизации скорости и определения моментов считывания интерферограммы используется опорный канал. В качестве источника опорного излучения используется DFB-лазер с длиной волны 0.76 мкм при оптимальной мощности 2 мВт. Существенно, что излучение этого лазера находится в видимой области спектра. Это излучение поступает по оптоволокну, свободный конец которого закреплен в разьеме 13 (рис. 1) в коллиматор 14, где превращается в параллельный пучок и направляется зеркальной призмой 15 в светоделитель 1 параллельно оптической оси интерферометра. Пройдя через интерферометр, опорное излучение через призму 16 собирается линзой на кремниевый приемник 17.

Оптические и механические узлы спектрометра размещены на оребренном основании 18. Это основание соединено с корпусом прибора через 5 металлорезиновых виброизоляторов 19 [8].

Внешний вид оптико-механического блока показан на рис. 3.

ЮСТИРОВКА

Юстировка интерферометра осуществляется перемещением отражателя 3 (рис. 1) в двух направлениях, перпендикулярных оптической оси отражателя. Для перемещения используются два микрометрических винта 20. После завершения юстировки положение отражателя фиксируется четырьмя прижимными винтами.

Настройка фотоприемника 7 осуществляется аналогичным способом. Кроме того, предусмот-

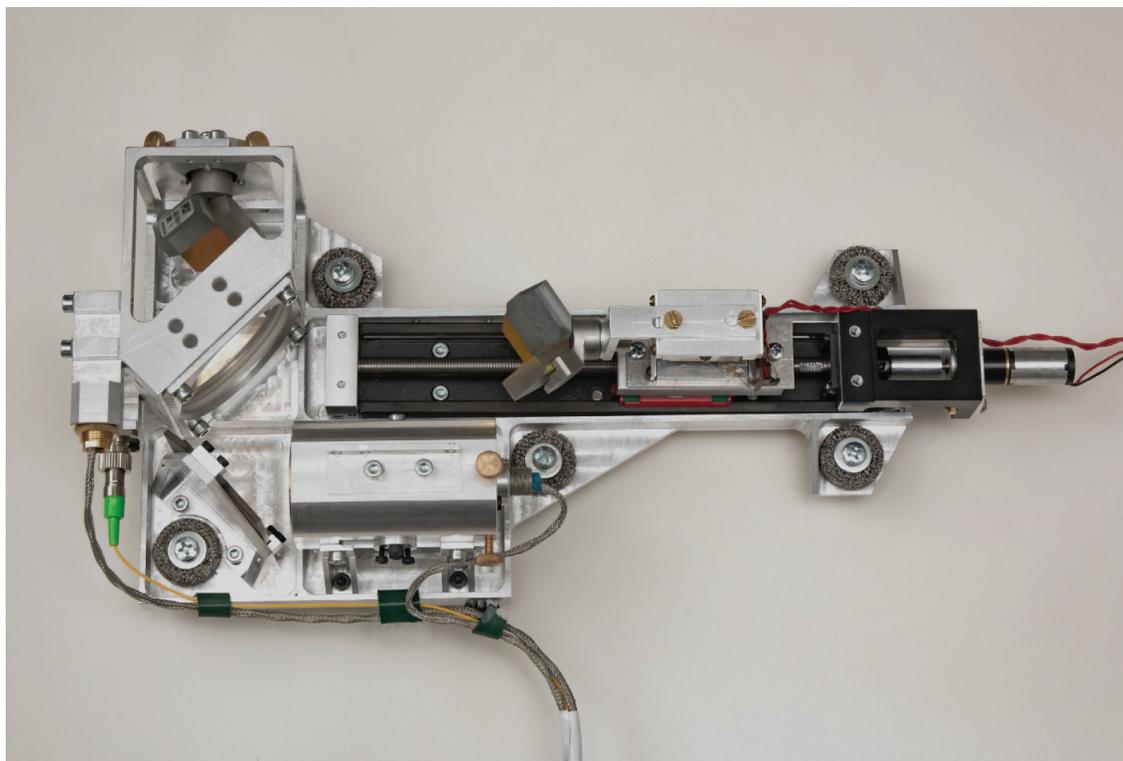


Рис. 3. Внешний вид опико-механического блока.

рено его перемещение вдоль оси объектива *b*. Это связано с тем, что объектив имеет значительную хроматическую aberrацию и при калибровке этого узла по Солнцу следует найти такое положение приемника, которое обеспечит равномерное облучение его без снижения его чувствительности.

Качество юстировки опорного канала определяется точностью настройки коллиматора. В данном образце элементы микрометрических перемещений отсутствуют. Коллиматор настраивался перед установкой на корпус интерферометра, а нужное угловое положение коллиматора обеспечивалось доработкой его посадочной поверхности. Аналогичные операции проводились с узлом приемника опорного канала.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА

Прибор содержит три функциональных узла (рис. 4): *УРИ* – узел регистрации интерферограммы; *УОК* – узел опорного канала; *УУД* – узел управления движением.

Узел опорного канала (УОК)

Скорость изменения оптической разности хода измеряется по длительности периодов референтного сигнала. Модулированное излучение лазера поступает на кремниевый фотодиод ВРХ65

фирмы OSRAM. Выходное напряжение сигнала усиливается предварительным усилителем с дифференциальным выходом, смонтированным на небольшой плате, до амплитуды 1–3 В. Провода от фотоприемника до предварительного усилителя и далее до платы компаратора экранированы металлической оплеткой. Компаратором МАХ9144, установленным на отдельной плате, выполняется преобразование этого сигнала в меандр. Работа следующих двух узлов регулируется этим меандром.

Узел регистрации интерферограммы (УРИ)

Регистрация излучения, прошедшего через интерферометр, осуществляется пиродетектором Р5600 фирмы DLTAGS. Его ток преобразуется предварительным усилителем с дифференциальным выходом в напряжение в диапазоне ± 5 В. Имеется возможность регулирования рабочего режима пиродетектора и коэффициента усиления сигнала.

Для оцифровки используется дифференциальный 24-разрядный АЦП LTC2380, выполненный на отладочной плате DC2289А компании Linear. После АЦП стоит отладочная плата stm32f4discovery (МКП-1), микропроцессор которой по последовательному интерфейсу SPI считывает данные из АЦП в моменты возрастающего пересечения меандром нуля. Данные по USB передаются в ПК, который также используется для управления про-

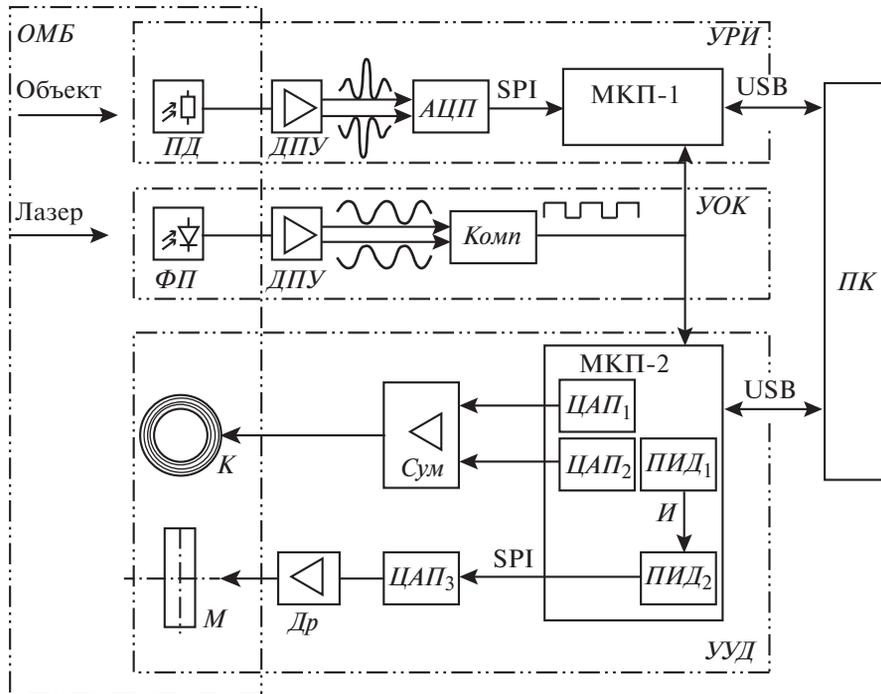


Рис. 4. Функциональная схема опытного образца. *ОМБ* – оптико-механический блок, *ПД* – пиродетектор, *ФП* – кремниевый фотоприемник, *К* – катушка механизма подстройки скорости, *М* – электромотор, *ДПУ* – дифференциальный предварительный усилитель, *Др* – драйвер электромотора, *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь, *ЦАП₁–ЦАП₃* – цифроаналоговые преобразователи, *Сум* – сумматор, *Комп* – компаратор, *МКП* – микропроцессоры на отладочных платах, *ПИД* – пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор, *И* – интегрирующая ветвь регулятора, *УРИ* – узел регистрации интерферограммы, *УОК* – узел опорного канала, *УУД* – узел управления движением, *ПК* – персональный компьютер, *SPI* и *USB* – последовательные интерфейсы.

цессом считывания и для отображения текущей информации об интерферограмме.

Узел управления движением уголкового отражателя (УУД)

Ключевой частью узла управления движением является микроконтроллер *stm32f407* от *STmicroelectronics*, расположенный на отладочной плате *stm32f4discovery* (*МКП-2*). Программа микроконтроллера выполняет измерение длительности каждого периода меандра, сравнение с эталонным значением, равным 1.5 мс, и нахождение их разности – ошибки стабилизации. Полученная разность является входным параметром системы управления движением уголкового отражателя.

Управление движением осуществляется двумя *ПИД*-регуляторами. Движением механизма подстройки скорости, который установлен на подвижной каретке *И* (рис. 1), управляет *ПИД₁* через *ЦАП₂*, который вместе с *ЦАП₁* входит в состав микроконтроллера *МКП-2* отладочной платы. Для обеспечения нулевого тока катушки в среднем, не отклоненном, положении отражателя *ЦАП₁* задает постоянное напряжение, равное среднему значению сигнала *ЦАП₂*. Оба аналоговых сигнала

объединяются в операционном усилителе сумматора и поступают на катушку механизма подстройки скорости.

Для управления скоростью движения каретки интегральное значение регулятора *ПИД₁* подается на вход регулятора *ПИД₂*. Выход с него по *SPI* через собранный на отдельной плате *ЦАП₃* и драйвер *LV1641* подается к мотору, вращающему ходовой винт. Эта ступень обеспечивает компенсацию только низкочастотных отклонений скорости и предотвращает большое отклонение отражателя относительно каретки. Коэффициенты *ПИД*-регуляторов задаются с помощью *ПК*, на экране которого отражаются данные о величине среднего отклонения (по абсолютной величине) длительности каждого периода меандра от номинала.

При заданной скорости мотор потребляет не более 40 мВт при напряжении 3 В. Мощность, потребляемая катушкой в рабочем режиме, не превышает 50 мВт.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Задача испытаний данного образца состояла в определении стабильности скорости изменения оптической разности хода и получении аппарат-

ной функции, совпадающей с теоретической. Заданная скорость изменения оптической разности хода равна 0.05 см/с.

Выбор оптимальных коэффициентов для ПИД₁ показал, что, дифференциальный канал не позволяет убрать влияние высокочастотных вибровоздействий. Поэтому коэффициент этого канала был принят равным нулю, но в конструкцию опытного образца были введены виброизоляторы 19 (рис. 1). Коэффициент дифференциального канала ПИД₂ был также принят равным нулю. Величина нестабильности скорости определялась при сравнении длительности каждого периода меандра опорного канала с заданной. Оптимальный подбор коэффициентов в каналах обоих регуляторов обеспечил отклонение скорости не выше $\pm 3.5\%$.

Аппаратная функция — это отклик прибора на излучение лазера, поступающее в прибор вдоль оптической оси. Использовались поочередно два He-Ne-лазера с длиной волны 0.6328 и 3.39 мкм соответственно. Максимальная оптическая разность хода в одну сторону от нулевой оптической разности хода была выбрана равной 15 см, а в другую — 0.5 см. Полное перемещение каретки равно 8 см. Теоретически в этом случае аппаратная функция должна иметь вид функции sinc (sinus cardinalis) с шириной 0.04 см^{-1} , что вполне соответствует оговоренному выше требованию к спектральному разрешению.

Особенность построения спектров лазерного излучения состоит в том, что интерферограмма не имеет четкого положения, соответствующего нулевой оптической разности хода. Поэтому при фурье-преобразовании такой интерферограммы следует подбирать положение начальной точки, т.е. фазовую поправку, обеспечивающую симметричность получаемой аппаратной функции.

Ширина спектральных линий лазерного излучения на всех спектрах, полученных с использованием быстрого фурье-преобразования, составляла $0.06\text{--}0.08 \text{ см}^{-1}$. Для поиска причин увеличения ширины относительно ожидаемой были построены спектры отдельных фрагментов каждой интерферограммы, взятых при различных оптических разностях хода, и найдены волновые числа центров спектральных линий в каждом спектре. Кроме того, был проведен анализ длительности периодов сигнала в интерферограммах в предположении абсолютной стабильности меандра опорного канала. Оказалось, что период монотонно увеличивается за весь путь в разных экспериментах на $0.005\text{--}0.01\%$. Этот эффект кажется незначительным, однако, учитывая высо-

кое разрешение, этого оказывается достаточно, чтобы увеличить ширину аппаратной функции вплоть до двух раз. После того, как это было учтено при использовании классического косинусного фурье-преобразования, все полученные спектры хорошо совпали с расчетной аппаратной функцией. Ширина центрального пика составляла $0.035\text{--}0.04 \text{ см}^{-1}$ в зависимости от реальной величины максимальной оптической разности хода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний опытного образца подтвердили работоспособность предложенных компоновки и программного обеспечения и возможность приступить к разработке штатного образца. Измеренная масса опытного образца, равная 1090 г, и его габариты ($330 \times 140 \times 80 \text{ мм}$) будут уменьшены при использовании более компактного варианта направляющей HIWIN KK30. Будут введены элементы, облегчающие юстировку референтного канала.

Авторы благодарят Д.Е. Мерзлякова за монтаж электронных плат и В.Н. Шашкина, изготовившего все детали опытного образца, а Б.Е. Мошкин также выражает благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку данной работы (грант РНФ16-12-10453).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A., Fedorova A.A., Shakun A.V., Grigoriev A.V., Moshkin B.E., Ignatiev N.I., Forget F., Lefevre F., Anufreychik K., Dzubn I., Ivanov Y.S., Kalinnikov Y.K., Kozlova T.O., Kungurov A. et al. // Space Sci. Rev. 2018. V. 214(7). doi 10.1007/s11214-017-0437-6
2. Мошкин Б.Е., Григорьев А.В., Шакун А.В., Пацаев Д.В., Жарков А.В., Вагин В.А. // ПТЭ. 2018. № 1. С. 116. doi 10.7868/S0032816217060088
3. Silverman S., Peralta R., Christensen Ph., Mehall G. // Acta Astronautica. 2006. V. 59. Issue 8—11. P. 990. doi 10.1016/j
4. Мошкин Б.Е., Жарков А.В., Маслов И.А., Сазонов О.В. // ПТЭ. 2018. № 6. С. 112. doi 10.7868/S0032816218050245
5. Белл Р.Дж. Введение в фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975.
6. Морозов Ф.Н., Светличный С.И. Основы фурье-спектрорадиометрии. М.: Наука, 2014.
7. Балашов А.А., Вагин В.А., Егоров А.И., Мошкин Б.Е., Нестерук И.Н., Хорохорин А.И. // Радиооптика. 2015. № 6. С. 37.
8. Лазуткин Г.В., Паровой Ф.В., Тройников А.А. // Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та. 2011. Вып. 3(27). С. 284.