

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО НАВЕДЕНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ТРАССОВОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

В.Р. Бессонов

bessonovvr@student.bmstu.ru

А.Ф. Суянов

suyanovaf@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Рассмотрена установка, состоящая из опорно-поворотного устройства, инфракрасного фурье-спектрометра среднего спектрального разрешения. Представлены электронные компоненты экспериментальной установки, а также процедура получения экспериментальных данных и апробация и метода наведения. Показан алгоритм наведения, который способен на основании значений, возвращаемых со спектрометра, принимать решение о направлении движения опорно-поворотного устройства с установленным на нем источником излучения. Описаны физический принцип работы трассового фурье-спектрометра, методы передачи данных и алгоритмы наведения. Проведен анализ экспериментальных данных и выполнено сравнение способов наведения. Сделаны выводы об эффективности того или иного метода наведения.

Ключевые слова: системы наведения, электронные системы самонаведения, опорно-поворотное устройство, автоматизация, фурье-спектрометр, инфракрасное излучение, диаграмма направленности

Введение. Трассовые фурье-спектрометры находят широкое применение в качестве анализаторов состава различных веществ и активно используются в различных областях, включая криминалистические [1], научные эксперименты [2, 3] и другие сферы исследований [4]. Однако для обеспечения их корректной работы требуется источник излучения, который должен быть строго соосен объективу фурье-спектрометра. В реальных условиях задача точного наведения источника на спектрометр достаточно сложна для человека, поскольку даже незначительные отклонения могут привести к снижению мощности получаемого излучения. В подобных ситуациях применение алгоритмов автоматического наведения источника излучения становится особенно актуальным, поскольку они способны выполнить эту задачу с большей скоростью и точностью, минимизируя влияние человеческого фактора и повышая общую эффективность работы спектрометра.

Инфракрасный фурье-спектрометр. Фурье-спектрометры представляют собой модуляционные спектральные приборы, в которых для получения спектра необходимо выполнить обратное преобразование Фурье от экспери-

ментально регистрируемого сигнала. Основой таких спектрометров является устройство, модулирующее световой поток в зависимости от длины волны излучения. Наиболее распространенным примером служит двухлучевой интерферометр Майкельсона, состоящий из двух зеркал (одно из которых подвижное) и светоделителя [5]. Принцип действия этого интерферометра основан на том, что излучению каждой длины волны соответствует определенная интерференционная кривая, зависящая от разности хода интерферирующих лучей. Регистрируя интенсивность света на выходе интерферометра в зависимости от положения подвижного зеркала, получают интерферограмму. Спектр восстанавливается из интерферограммы с помощью преобразования Фурье. Фурье-спектрометры имеют ряд преимуществ перед дисперсионными спектрометрами, таких как многоканальность (выигрыш Фелжета), высокое отношение сигнал/шум и возможность одновременной регистрации всего спектрального диапазона [6].

Фурье-спектроскопия обладает рядом значительных преимуществ по сравнению с традиционными методами спектрального анализа, что делает ее незаменимым инструментом в научных исследованиях и прикладных задачах. Она обеспечивает высокую разрешающую способность благодаря применению преобразования Фурье. Это позволяет детально анализировать сложные спектры, выявляя даже незначительные особенности и компоненты, что значительно повышает точность и достоверность получаемых данных.

Использование инфракрасного (ИК) излучения в фурье-спектроскопии обусловлено несколькими ключевыми преимуществами, связанными с уникальными особенностями этого диапазона и применяемыми методами анализа. Во-первых, выигрыш Фелжета (мультиплексный выигрыш) позволяет регистрировать все спектральные компоненты одновременно, что существенно сокращает время анализа и увеличивает отношение сигнал/шум. Во-вторых, выигрыш Жакино (апертурный выигрыш) способствует эффективному использованию фотодетекторов и оптических компонентов, минимизируя потери света и повышая чувствительность системы, что особенно важно в ИК-диапазоне. В-третьих, выигрыш Кона (аподизация) улучшает разрешение и четкость спектральных линий за счет уменьшения артефактов в преобразованном спектре. Также ИК-диапазон соответствует энергиям колебательных переходов молекул, что позволяет детектировать и идентифицировать различные функциональные группы и химические связи [8, 9]. Эти особенности делают ИК-излучение идеальным для фурье-спектроскопии, обеспечивая высокую чувствительность, точность и скорость анализа, что критически важно для научных исследований и прикладных задач.

Процедура измерения трассового фурье-спектрометра. В качестве опорно-поворотного устройства было взято опорно-поворотное устройство УР3040, характеристики которого приведены ниже:

Разъемы	1 порт RS-485
Питание:	
мощность, Вт	30
параметры входного напряжения	24 В, переменный ток частотой 50/60 Гц
Размеры, мм	288×165×188,5
Масса, кг	4,2
Поворот, наклон и масштабирование:	
диапазон поворота, град.	0...355
диапазон наклона, град.	+10...-80
скорость поворота, град./с	7,5
скорость наклона, град./с	6,0

Выбранное устройство используется для поворота, наклона и управления сетевой камерой (Pan Tilt Zoom camera, или PTZ) и является системой из двух электромоторов, оси которых установлены перпендикулярно друг другу, позволяя покрывать камерой наибольшую наблюдаемую площадь. Вместо камеры был установлен источник ИК-излучения.

В данной работе опорно-поворотное устройство управляется с помощью контроллера посредством протокола Pelco-D. Для отправки данных по протоколу Pelco-D необходимо собрать установку, схема которой показана на рис. 1. На микроконтроллере реализована система перевода поступающего сигнала в протокол Pelco-D [10] по таблице, приведенной ниже [11]. Для автоматизации эксперимента можно посылать уже упрощенные команды на микроконтроллер, а тот, в свою очередь, будет отправлять эти байты на опорно-поворотное устройство [12].

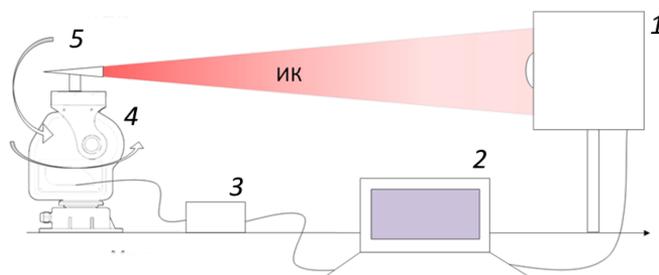


Рис. 1. Схема установки:

ИК — инфракрасное излучение; 1 — фурье-спектрометр; 2 — компьютер; 3 — микроконтроллер; 4 — опорно-поворотное устройство; 5 — инфракрасный излучатель

Фурье-спектрометр отправляет сигналы на компьютер, тот, в свою очередь, выводит их на экран, анализирует и сохраняет на диск.

В рамках данной системы функционирование осуществляется следующим образом: на компьютере создается алгоритм движения в виде спирали или линейного движения, далее задаются его параметры, такие как сторона квадрата или длина шага линейного движения, и сохраняется файл с командами `commands.txt`. Он выглядит как набор символов формата UTF-8, обозначающих определенные команды (табл. 1). Был создан целый алфавит таких команд и обозначений, которые запрограммированы на микроконтроллере и могут быть переданы компьютером по СОМ-порту. С помощью него предусмотрено несколько скоростей движения, заданных как kn , где n — длина шага, которая задана в прошивке микроконтроллера и равна 25 мс, а k — коэффициент, на который умножается стандартная длина шага, в результате чего получаются различные конфигурации.

Таблица 1

Команды, принимаемые микроконтроллером

Команда	Непрерывное движение	Большой шаг ($5n$)	Средний шаг ($3n$)	Маленький шаг ($1n$)
Верх	W	F	T	I
Вниз	S	C	G	K
Влево	A	X	R	L
Вправо	D	V	Y	J
Стоп		Q		
Примечание. Значение n — длина шага (25 мс). Передаваемые наборы байтов для удобства показаны в виде символов в формате UTF-8.				

Один из алгоритмов создает матрицу размером N следующим образом: записывает в файл `commands.txt` команду «маленький шаг налево N раз, вниз 1 раз, маленький шаг направо N раз, вниз». Повторяя такой набор команд, можно получить соответствующее движение оси источника ИК-излучения, если представлять его в виде сетки дискретных значений, то оно покрывает всю плоскость объектива спектрометра и его окрестностей.

Далее этот файл передается основной программе анализа измерений фурье-спектрометра, которая получает на вход данные от спектрометра и дает команды микроконтроллеру. В бесконечно повторяющемся цикле программа получает весь спектр, выделяет оттуда максимум и минимум, сохраняет максимум в файл `maxu.txt` и далее, следуя командам от файла `commands.txt`, передает такие же команды микроконтроллеру, используя про-

токол RS-232, используя таблицу соответствий команд и алгоритмов действий. Опорно-поворотное устройство движется и меняет положение в пространстве ИК-излучателя, меняя угол освещения относительно направления к трассовому фурье-спектрометру, который регистрирует новый спектр. Анализируя изменения в спектрах в зависимости от движений, можно составить диаграмму направленности. Все эти процессы представлены на рис. 2 в виде блок-схемы.

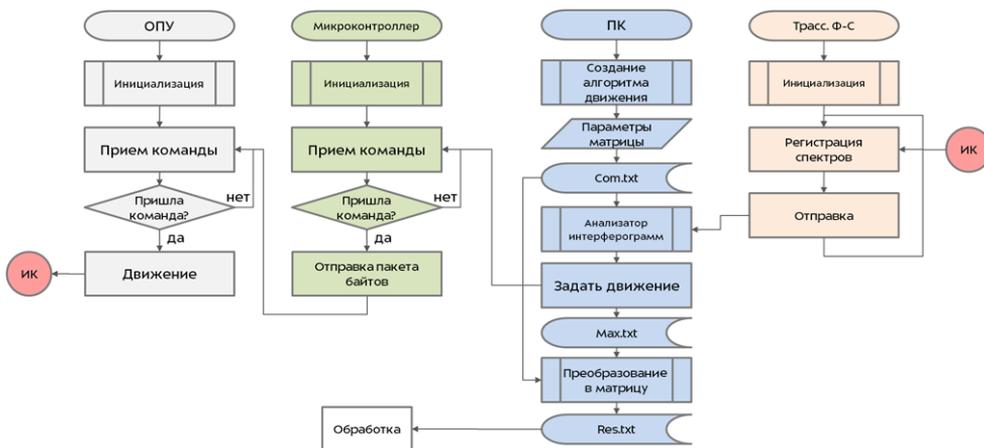


Рис. 2. Блок-схема работы программы наведения

Анализ экспериментальных данных. На первом шаге задается движение слева направо: в специальной программе был создан файл command.txt заполненный символами «маленький шаг направо» (J), и система пошагово снимала показания, делала один шаг направо и т. д. Выполнено несколько измерений и в результате наложения графиков и построением их среднего, а также нормировкой получен график, изображенный на рис. 3. Видно, что интенсивность имеет один характерный пик, приходящийся на момент совпадения осей спектрометра и ИК-излучателя.

Влияние освещенности на результаты экспериментов в физике является важным аспектом, особенно при использовании оптических методов регистрации. В ходе проведения экспериментов в лаборатории было обнаружено появление дополнительного пика в спектре измеряемой величины вблизи значения -80° , что связано с неравномерным освещением рабочего пространства из-за окон, расположенных с одной стороны от установки. Несмотря на это данный фактор практически не влияет на достоверность результатов эксперимента, поскольку обнаруженный артефакт является стабильным и воспроизводимым, и его влияние на общую картину незначительно.

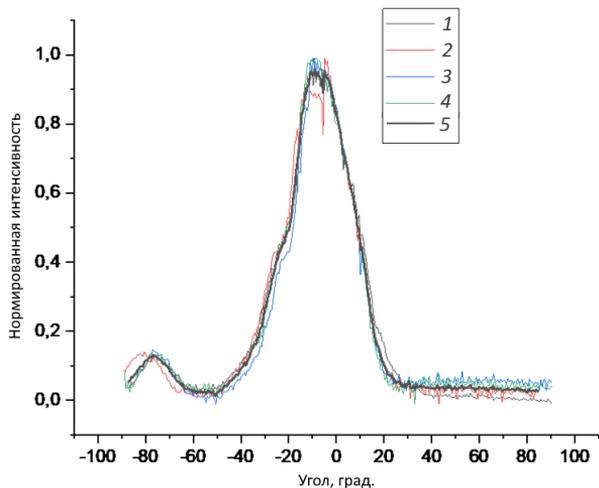


Рис. 3. Результаты измерения интенсивности трассового инфракрасного фурье-спектрометра:

1–4 — графики полученные в первом, втором, третьем и четвертом повторениях опыта соответственно; 5 — среднее этих четырех

На втором шаге были измерены зависимости интенсивностей по двум осям. Нормированные и сглаженные графики приведены на рис. 4, а и б. В данном эксперименте источник инфракрасного излучения не точечный, а имеет вид спирали, с выводами питания, расположенными вверху слева и внизу справа, поэтому максимум имеет неправильную диагональную форму с утолщением посередине, по форме совпадающим с излучателем.

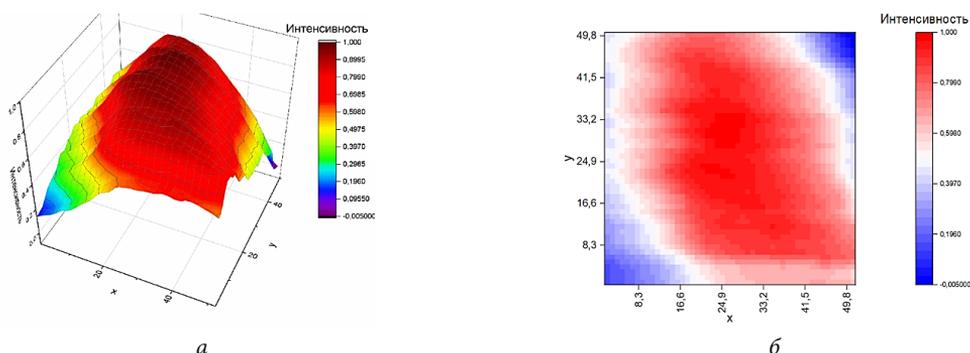


Рис. 4. Нормированные и сглаженные функции интенсивностей в зависимости от отклонений источника ИК-излучения по осям x и y

Алгоритмы наведения. Алгоритм наведения проверяет ближайшие точки, выбирает одну с максимальным значением и движется в выбранном

направлении. Алгоритм просматривает точку слева, затем возвращается к начальной точке, движется вниз и обратно и т. д., просматривая четыре точки в различных направлениях и четырежды центральную точку. Затем, сравнивая значения интенсивности, полученные со спектрометра, алгоритм принимает решение повернуть источник ИК-излучения в сторону точки с наибольшим значением. Затем все эти действия повторяются. Внешний вид программного окна данного алгоритма представлен на рис. 5. Интерфейс включает в себя интерферограмму, основные характеристики, такие как высота и количество пиков, а также отношение сигнал шум (SNR), и в отдельном окне — значения интенсивностей окрестных точек и текущее направление движения.

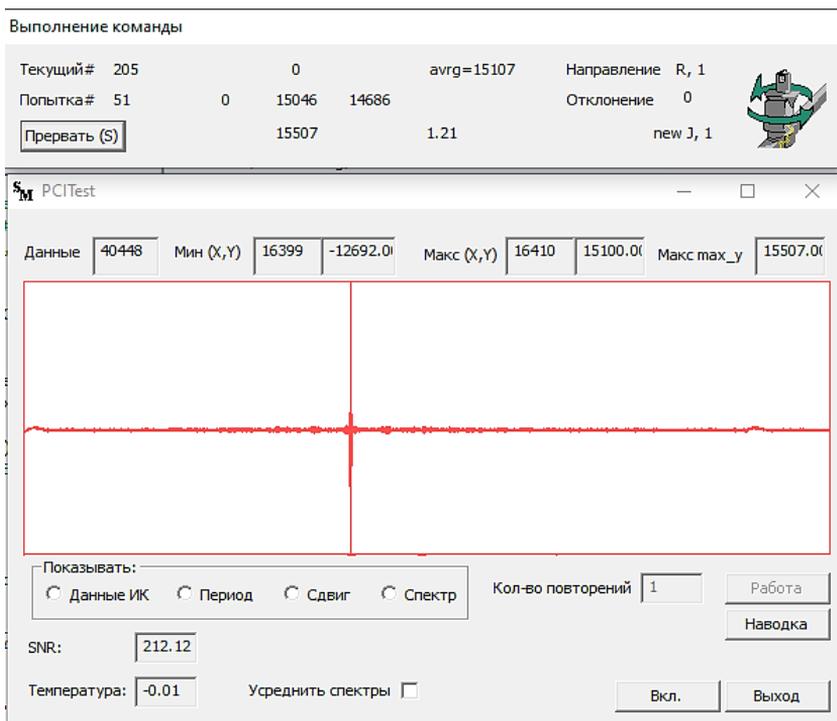


Рис. 5. Интерфейс программы в процессе наведения

Также существует переменный шаг, позволяющий делать бóльшие шаги на «неинтересных участках» (например, нижнее плато, которое является лишь фоновой засветкой, а не сигналом, что хорошо видно на рис. 3) и уменьшать длину шага по мере приближения к максимуму. В простейшем алгоритме реализовано в виде деления всех возможных интенсивностей на три зоны:

- 1) наименьшая (все точки с интенсивностями менее 9 000 отн. ед.);
- 2) средняя (интенсивности в диапазоне от 9 000 до 14 000 отн. ед.);
- 3) наибольшая (интенсивности выше 14 000 отн. ед.).

Анализ эффективности алгоритма. С точки, смещенной от оси спектрометра на $\pm 30^\circ$ по обеим перпендикулярным осям, алгоритм приходит к наведенному состоянию за 40–60 циклов, или за 3–5 мин работы.

Во время процесса наведения программа сохраняет каждое снятое показание в сетку и затем сохраняет данные в файл для последующего анализа. На рис. 6 показано, что движение началось в зоне «желтых» точек. Можно заметить, что алгоритм двигался в направлении к области с большей интенсивностью, пропуская по пять значений за шаг. Источник ИК-излучения был отклонен на угол порядка 30° , следовательно, на спектрометр попадала малая часть излучения, и алгоритм, понимая, что пик находится не в окрестности текущей точки и делал большие шаги. В дальнейшем шаг уменьшался до трех значений, и в заключительной стадии, при приближении к искомой точке, алгоритм использовал минимально возможный шаг, поскольку была вероятность пропуска максимума.

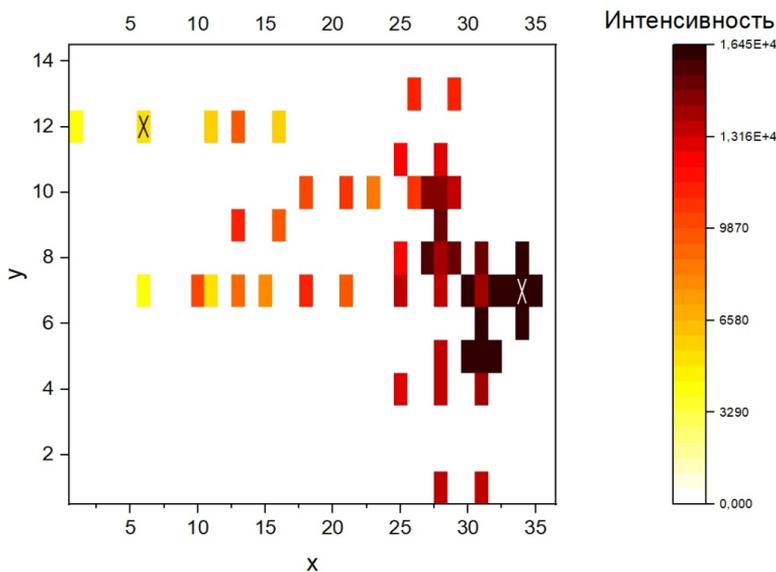


Рис. 6. Визуализация полученных данных при наводке. Крестиками отмечены начальная (левее) и конечная (правее) точки

Заключение. В ходе проведения данного исследования разработан и протестирован алгоритм наведения трассового инфракрасного фурье-спектрометра, который управляет опорно-поворотным устройством по обратной связи

от измеренной интенсивности ИК-излучения. Представленные алгоритмы базировались на анализе интенсивности излучения и изменении угла наклона. Полученные экспериментальные данные подтверждают предположение о наличии одного значительного пика при повороте и сборе данных по двум осям. Данное техническое решение применяется для автоматизации систем управления в трассовых фурье-спектрометрах, а также имеет потенциал для использования в других областях оптики, где требуется поиск максимума.

Литература

- [1] Quispe M., Trigo J.D., Serrano-Arriezu L., Huere J., Quispe E., Beruete M. Classification of South American Camelid and goat fiber samples based on Fourier transform infrared spectroscopy and machine learning. *The Journal of the Textile Institute*, 2024. <https://doi.org/10.1080/00405000.2024.2324209>
- [2] Lapeyre P., Miguel R.B., Nagorski M.C., Gagnon J.P., Chamberland M., Turcotte C., Daun K.J. Quantifying flare combustion efficiency using an imaging Fourier transform spectrometer. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2024, vol. 74 (5), pp. 319–334. <https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2319773>
- [3] Deichuli V.M. et al. Measurements of air-broadening parameters of water vapour transitions in the 5090–7490 cm^{-1} spectral region'. *Molecular Physics*, 2023, vol. 121 (15). <https://doi.org/10.1080/00268976.2023.2216133>
- [4] El-Midany A.A. et al. Effect of grinding conditions on oil shale surface: FTIR analysis'. *Particulate Science and Technology*, 2023, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1080/02726351.2023.2292285>
- [5] Морозов А.Н. и др. Результаты экспериментальных исследований панорамного инфракрасного фурье-спектрометра. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2016, № 2 (65), с. 51–64.
- [6] Морозов А.Н., Светличный С.И. *Основы Фурье-спектрометрии*. Москва, Наука, 2014, 456 с.
- [7] Зайцев К.И., Гавдуш А.А., Карасик В.Е., Юрченко С.О. Высокоточное восстановление спектральных оптических характеристик среды с помощью терагерцовой импульсной спектроскопии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2014, № 3, с. 69–92.
- [8] Glagolev K.V., Golyak Ig.S., Golyak Il.S., Esakov A.A., Kornienko V.N., Morozov A.N., Tabalin S.E., Kochikov I.V., Svetlichnyi S.I. Technique for obtaining and processing spectral information with static Fourier spectrometer. *Optics and Spectroscopy*, 2011, vol. 110, no. 3, pp. 449–455.
- [9] Вагин В.А., Гершун М.А., Жижин Г.Н. и др. *Светосильные спектральные приборы*. Москва, Наука, 1988, 264 с.
- [10] *Техническая спецификация — 58993/RU/M2.3/09201*. Pan-Titl motor YP3040, 2021, 2 p.

- [11] *YP3040 Pan-Tilt Motor Installation Guide*. URL: <https://www.axis.com/dam/public/76/4d/02/yp3040-pan-tilt-motor--installation-guide-en-US-105107.pdf> (дата обращения 25.12.2023).
- [12] *TF-0002. PELCO Engineering Design Standard*. Pelco "D" Protocol Manual, 2003, 7 p.

Поступила в редакцию 10.06.2024

Бессонов Вячеслав Романович — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Суянов Амир Фаилевич — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Фуфурин Игорь Леонидович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бессонов В.Р., Суянов А.Ф. Система автоматического наведения инфракрасного трассового фурье-спектрометра. *Политехнический молодежный журнал*, 2024, № 05 (94). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/che/1005.html>

AUTOMATIC GUIDANCE SYSTEM OF THE INFRARED TRACK FOURIER SPECTROMETER

V.R. Bessonov

bessonovvr@student.bmstu.ru

A.F. Suyanov

suyanovaf@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The paper considers a setup consisting of a pan-and-tilt device and the infrared Fourier spectrometer with the average spectral resolution. It presents electronic components of the experimental setup, as well as a procedure in obtaining the experimental data and testing the guidance method. The paper shows the guidance algorithm able to make a decision on the pan-and-tilt device motion direction with a radiation source installed on it based on the values received from the spectrometer. It describes a physical principle of the track Fourier spectrometer operation, data transmission methods and the guidance algorithms. The paper provides an analysis of the experimental data and compares the guidance methods. It concludes on the efficiency of one or another guidance method.

Keywords: guidance systems, electronic homing systems, pan-and-tilt mechanism, automation, Fourier spectrometer, infrared radiation, radiation pattern

Received 10.06.2024

Bessonov V.R. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Suyanov A.F. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Fufurin I.L., Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Bessonov V.R., Suyanov A.F. Automatic guidance system of the infrared track Fourier spectrometer. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal*, 2024, no. 05 (94). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/che/1005.html>