

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ В СОСТАВЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОРАДИОМЕТРА

А.А. Остриченко

arina.ostrichenko@gmail.com

SPIN-код: 3588-1749

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

Аннотация

Рассмотрена микроболометрическая камера, представляющая собой фотоприемное устройство (ФПУ) инфракрасного излучения, выполнены измерения ее основных параметров: чувствительности ФПУ и отношения сигнал/шум (SNR) приемника. Данные величины применяются для настроек модулей микроболометрической камеры в составе прибора. Полученная в результате эксперимента чувствительность камеры составила 80 мК, что оказалось хуже заявленного, а SNR прибора, приведенное к одному градусу, оказалось равным 342. Построена зависимость отношения сигнал/шум от частоты работы затвора микроболометрической камеры. Для подтверждения работоспособности получен спектр аммиака, выполнено его сравнение с эталонным спектром.

Ключевые слова

Спектральный анализ, фотоприемное устройство, инфракрасное излучение, микроболометрическая камера, дискретные сигналы, низкочастотные фильтры, чувствительность микроболометрической камеры

Поступила в редакцию 29.05.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Микроболометрические матрицы используют в различных конфигурациях фурье-спектрометра [1, 2]. Схема размещения инфракрасной (ИК) камеры в составе статического фурье-спектрометра представлена на рис. 1. Излучение, входящее в интерферометр, с помощью светоделителя разделяется на два когерентных потока: отраженный и прошедший. После прохождения оптической системы эти потоки создают мнимое изображение на зеркалах интерферометра Майкельсона. С использованием проекционного объектива изображение формируется в плоскости фотоприемного устройства (ФПУ, ИК-камера), где наблюдается двумерная интерференционная картина. ИК-камеры представляют собой матрицу из микроболометрических детекторов, объединенных в связанную систему. Работа болометров основана на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента при его нагревании [3], в то время как в пироэлектрическом детекторе используется свойство спонтанной поляризации, которая зависит от температуры. Обнаружительная способность охлаждаемых ФПУ на основе тройного соединения CdHgTe (кадмий–ртуть–теллур, КРТ) составляет около 10^{10} см · Гц^{1/2}/Вт и на 2 порядка выше по сравнению с неохлаждаемыми фотоприемниками: пироэлектрическими и болометрическими (около 10^8 см · Гц^{1/2}/Вт) [4]. Однако нужно отметить, что график спектральной чувствительности неохлаждаемых матричных ФПУ полностью покрывает рабо-

чий диапазон 7...13 мкм, в то время как у большинства матриц фотодиодов КРТ существует провал чувствительности на длине более 10 мкм.

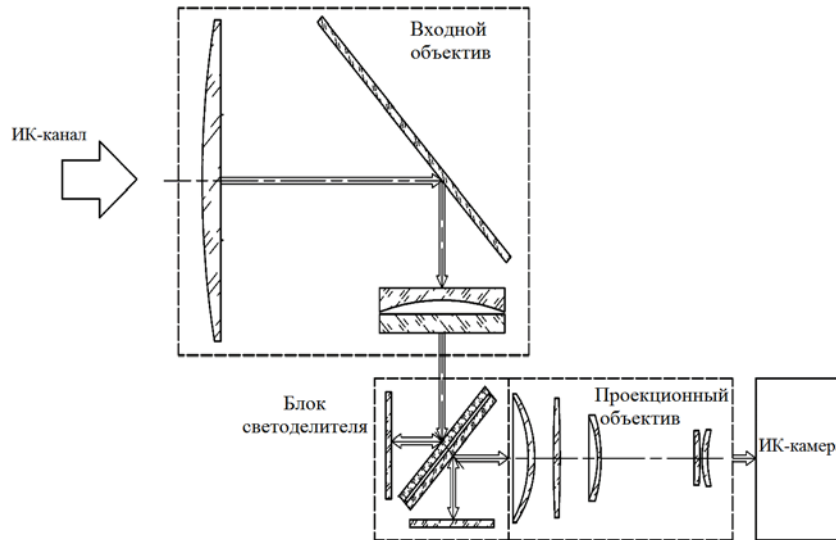


Рис. 1. Оптическая схема инфракрасного фурье-спектрометра

Отношение сигнал/шум в приборе зависит от освещенности детектора, изменения температуры ФПУ при самонагревании и от температуры окружающей среды. Такие закономерности могут быть устранены благодаря введению новых температурных коэффициентов для калибровки спектральных погрешностей [5].

Для компенсации температурных изменений матрицы требуется периодически осуществлять калибровку ИК-камеры с помощью механического затвора, чтобы избежать искажений неоднородности чувствительности пикселей в изображении интерферограммы. Механический затвор представляет собой поглощающую поверхность, помещенную перед детектором. Она является внутренним компенсатором, который необходим микроболометру, например, для компенсации пиксельных дрейфов. Для корректной работы затвора может использоваться специальный метод характеристической кривой [6]. При изменении температуры камеры от 3,9 до 47,3 °С изменяется и вид характеристической кривой, которая обеспечивает корректировку температуры микроболометрической камеры и окружающей среды. Регулировка межкадровых и внутрикадровых задержек способствует стабильной работе затвора и прибора [7].

В патенте [8] описана конструкция микроболометрического детектора для детектирования ИК-излучения в двух спектральных диапазонах. Благодаря тонкой прослойке тантала формируются широкий пик поглощения с максимумом на длине волны 8...9 мкм и следующий пик в диапазоне 3...5 мкм. Нитрид кремния, входящий в состав пленки, поглощает в диапазоне 9...13 мкм и имеет пик поглощения на длине волны 11...13 мкм. По мнению авторов патента, это

изобретение позволяет сохранять равные коэффициенты поглощения без снижения разрешающей способности. На основе [8] создана конструкция микроболометрической матрицы российского производства [9].

Для определения максимальной скорости измерения статического фурье-спектрометра увеличивают частоту измерений до 100 и 200 Гц [10], используя микроболометрическую матрицу на основе аморфного кремния с разрешением 640×480 пикселей. В работе [10] интерференционную картину с частотой 50 Гц обрезают до одной четвертой от первоначального изображения для достижения более высоких частот измерений до 200 Гц. Для достижения более высоких скоростей измерения уменьшают размер захватываемого кадра — для 100 Гц и 200 Гц.

Целью данной работы является определение чувствительности ИК-камеры, а также расстановка волновых чисел с помощью эталонного спектра аммиака. В процессе работы решаются следующие задачи: построение кривой отношения сигнал/шум от времени между двумя калибровками, определение в интерференционной картине по горизонтали и вертикали эквивалентной шуму разности температур (NETD), расстановка волновых чисел по оси абсцисс для построения спектра аммиака. Определено отношение сигнал/шум, приведенное к 1 К в интерферограмме, регистрируемой прибором.

Экспериментальная часть. Для проведения эксперимента использовали источник излучения в виде модели черного тела АЧТ-6А, источник питания АТН (модификация АТН-2333) и микроболометрическую камеру с установленным на ней объективом 40 мм F/1. Микроболометрическая камера имеет размер 640×480 пикселей: 640 столбцов и 480 строк.

В процессе эксперимента измеряли излучение абсолютно черного тела. При этом соблюдали разницу температур 3 К между излучателем АЧТ и окружающей средой, фиксировали шум как среднеквадратичное отклонение сигнала, измеренного на поверхности с одинаковой температурой, и от поверхности излучателя и прилегающей подложки, имеющей температуру окружающей среды. Также фиксировали разницу сигналов между поверхностью излучателя и прилегающей подложкой, имеющей температуру окружающей среды.

Чувствительность определяли согласно формуле

$$S = \frac{N}{A\Delta T},$$

где N — среднеквадратичное отклонение сигнала микроболометрической матрицы по области одной температуры; A — разница сигнала микроболометрической матрицы между поверхностями, имеющими разницу температуры $\Delta T = 3$ К.

На рис. 2 приведено ИК-изображение, получаемое с модели АЧТ-6А. Его представляли в виде матрицы целых чисел. Чувствительность находили по строкам и столбцам матрицы. Для определения чувствительности использовали столбец и строку, показанные на рис. 2, a , b в виде пунктирной линии.

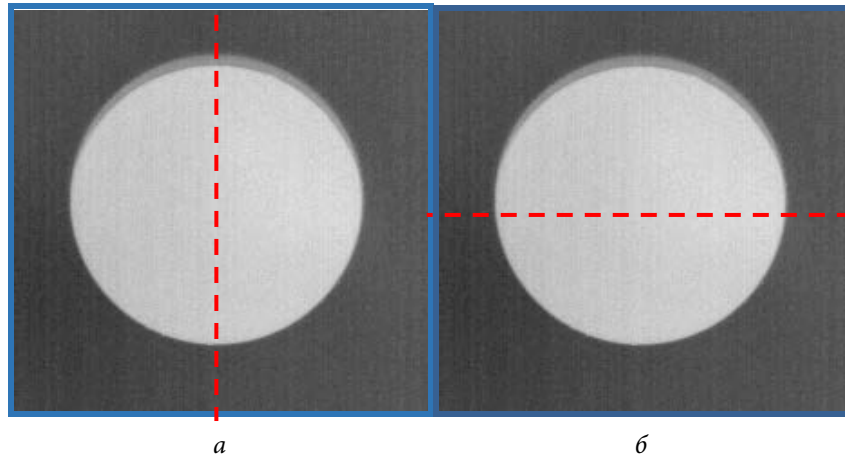


Рис. 2. Характерное ИК-изображение излучателя АЧТ-6А:

a — столбцы, по которым проводилось определение чувствительности;
б — строки, по которым проводилось определение чувствительности

По строке и столбцу, которые обозначены прямой линией на рис. 3, *a* и 4, *a*, измеряли сигнал, представленный на рис. 3, *б* и 4, *б*. Сигнал, полученный в областях с одинаковой температурой, подвергали низкочастотной фильтрации. На рис. 3, *б* и 4, *б* такие области обозначены цифрами 1, 2, 3.

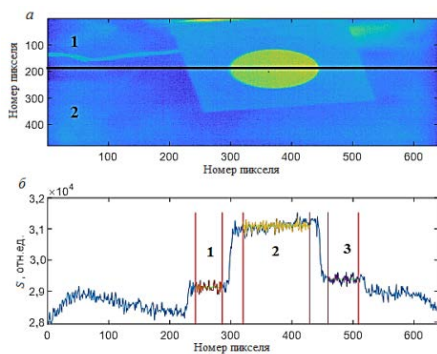


Рис. 3. Результаты определения чувствительности на модели АЧТ-6А:

a — снимок модели черного тела в дальнем ИК-диапазоне, время экспозиции 10 мкс, усиление сигнала 16, разность температур 3 К;
б — зависимость сигнала от номера элемента в строке

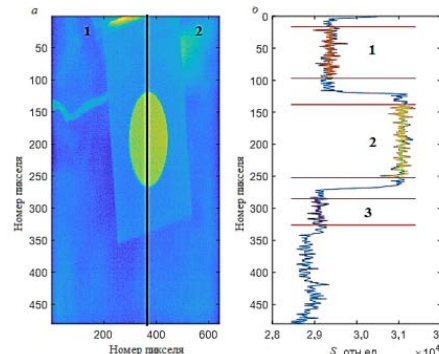


Рис. 4. Результаты определения чувствительности на модели АЧТ-6А:

a — снимок модели черного тела в дальнем ИК-диапазоне, время экспозиции 10 мкс, усиление сигнала 16, разность температур 3 К;
б — зависимость сигнала от номера элемента в столбце

Для определения чувствительности вычисляли эквивалентную шуму разность температур. В ходе эксперимента отношение сигнал/шум определяли для разных настроек микроболометрической камеры: экспозиции, усиления и смещения.

Результаты экспериментов по определению чувствительности ИК-камеры для строк и столбцов матрицы представлены в таблице. Каждому столбцу табли-

цы соответствует свое время экспозиции (10, 30, 50 и 70 мкс), каждой строке — значение чувствительности при различной комбинации усиления сигнала (16, 32, 64) и разницы температур в 1 или 3 К. Количество знаков после запятой обусловлено значением чувствительности, которая находится в пределах десятков-сотен милликельвин.

Чувствительность ИК-камеры

Усиление сигнала	Разность температур ΔT , К	Время экспозиции, мкс			
		10	30	50	70
<i>Чувствительность по строкам матрицы</i>					
32	1	0,186	0,106	0,083	—
32	3	0,162	0,089	0,079	0,091
64	1	0,187	0,109	0,100	—
64	3	0,161	0,098	0,083	—
16	3	0,180	0,114	0,093	0,094
<i>Чувствительность по столбцам матрицы</i>					
32	1	0,179	0,100	0,083	—
32	3	0,157	0,087	0,080	0,083
64	1	0,172	0,101	0,091	—
64	3	0,169	0,100	0,079	—
16	3	0,176	0,120	0,086	0,083

Прочерки в таблице означают перенасыщение излучением матрицы, когда ИК-камера не может правильно зарегистрировать данные. Перенасыщение наблюдались при усилении сигнала в 32 и 64 раза и самым большим времени экспозиции 70 мкс. При увеличении времени экспозиции чувствительность микроболومترической камеры падает во всех случаях, кроме эксперимента с усилением 32 и разницей температур 3 К. Отношение сигнал/шум увеличивается при возрастании времени экспозиции, так как происходит накопление сигнала, при этом уровень измеряемого сигнала линейно зависит от времени, а шум — пропорционально корню времени. Величина, эквивалентная шуму, — разность температур камеры — определяет чувствительность прибора: чем меньше значение этой величины, тем лучше чувствительность, и наоборот.

Отношение сигнал-шум в интерферограмме для прибора по соответствующему телесному углу при суммировании строк в интерферограмме, усредняемой по времени t с частотой 50 кадров/с:

$$SNR = \frac{\Delta T \Omega}{\delta T \Omega_{\text{сен}}} \sqrt{FPS \Delta t N_s},$$

где ΔT — расчетная разница температур; δT — чувствительность микроболومترической матрицы (установлено в эксперименте 80 мК); Ω — телесный угол видимости линзы перед микроболومترической матрицей прибора из центра

микроболометрической матрицы (составляет 0,3 срад); $\Omega_{\text{Хен}}$ — телесный угол видимости линзы объектива перед микроболометрической матрицей в эксперименте (составляет 0,84 срад); FPS — частота съемки изображений с микроболометрической матрицы; N_s — число усредняемых строк в интерферограмме (в данном случае 60).

Для получения интерферограммы с высоким отношением сигнал/шум требуется определить оптимальное время между калибровками, которое влияет на отношение сигнал/шум как представлено на рис. 5. Измерение проводили для частоты 50 кадров/с при усреднении 300 кадров.

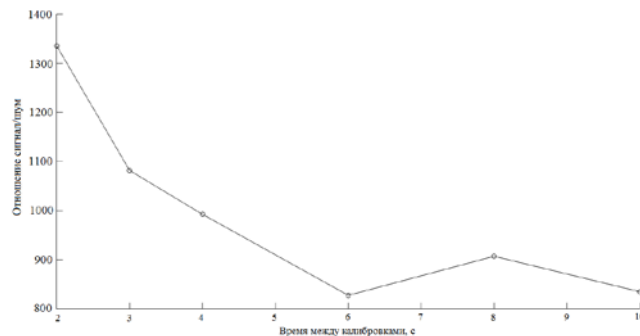


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал/шум от времени между калибровками

Для правильной расстановки волновых чисел был получен спектр аммиака. Методика получения спектра описана в книге [11], измерения представлены на рис. 6 в сравнении с эталонным из базы данных NIST Chemistry WebBook.

На рис. 6 видно, что основные полосы пропускания 965 и $932 \pm 2 \text{ см}^{-1}$ совпадают, что свидетельствует о хорошем качестве работы ИК-камеры в составе прибора.

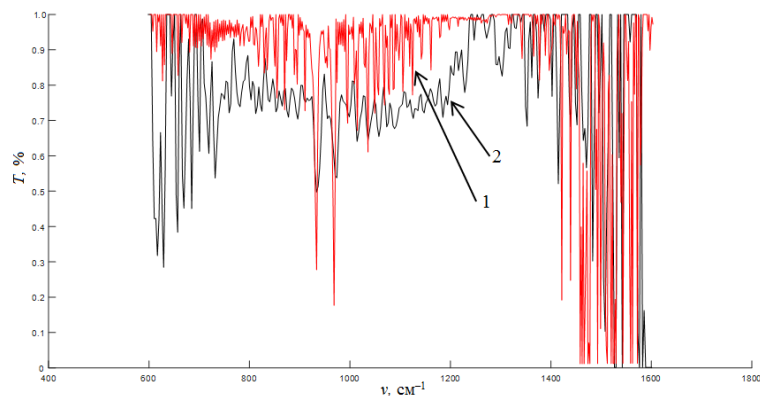


Рис. 6. Спектральный коэффициент пропускания аммиака:

1 — эталонный; 2 — экспериментальный

Обсуждение полученных результатов. Эксперимент с определением чувствительности микроболометрической камеры показал, что при усреднении изображений за 1 с отношение сигнал/шум равно 342. Таким образом, экспери-

ментальная чувствительность составила 80 мК, что не соответствует заявленной в паспорте чувствительности в 50 мК. При увеличении времени между калибровками меняется температура микроболометров ИК-камеры, поэтому эталонные калибровочные коэффициенты начинают терять свою точность, что ведет к ухудшению отношения сигнал/шум.

Заключение. Расчетные параметры чувствительности микроболометрической камеры в горизонтальном и вертикальном положении оказались больше заявленной в паспорте (80 мК вместо 50 мК), расчетное отношение сигнал/шум составило 342. Найденная из эксперимента зависимость отношения сигнал/шум от времени между калибровками в статическом фурье-спектрометрическом показала, что при увеличении времени между калибровками отношение сигнал/шум уменьшается вследствие потери актуальности калибровочных данных. С использованием эталонного спектра аммиака из базы данные NIST Chemistry WebBook выполнена расстановка волновых чисел в полученном спектре аммиака с правильными коэффициентами пересчета.

Литература

- [1] Svensson T., Bergström D., Axelsson L., et al. Design, calibration and characterization of a low-cost spatial Fourier transform LWIR hyperspectral camera with spatial and temporal scanning modes. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10644. DOI: 10.1117/12.2304628
URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10644/2304628/Design-calibration-and-characterization-of-a-low-cost-spatial-Fourier/10.1117/12.2304628.short>
- [2] Wang N., Wu J., Meng H., et al. Performance of a long-wave infrared Fourier Transform imaging spectrometer using a corner-cube Michelson interferometer and an uncooled microbolometer array. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9674. DOI: 10.1117/12.2197096
URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9674/1/Performance-of-a-long-wave-infrared-Fourier-Transform-imaging-spectrometer/10.1117/12.2197096.short>
- [3] Михеев С.В. Основы инфракрасной техники. СПб., ИТМО, 2017.
- [4] Башкин С.В., Карфидов А.О., Корниенко В.Н. и др. Панорамный Фурье-спектрометрический с многоэлементным фотоприемным устройством на спектральный диапазон 7–14 мкм. *Оптика и спектроскопия*, 2016, т. 121, № 3, с. 485–491. DOI: 10.7868/S0030403416090051
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0030403416090051>
- [5] Schardt M., Schwaller C., Tremmela A.J., et al. Thermal stabilization of static single-mirror Fourier transform spectrometers. *Proc. of SPIE*, 2017, vol. 10210. DOI: 10.1117/12.2261924 URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10210/1/Thermal-stabilization-of-static-single-mirror-Fourier-transform-spectrometers/10.1117/12.2261924.short>
- [6] Budzier H., Gerlach G. Calibration of uncooled thermal infrared cameras. *J. Sens. Sens. Syst.*, 2015, no. 4, pp. 187–197. DOI: 10.5194/jsss-4-187-2015 URL: <https://www.j-sens-sens-syst.net/4/187/2015/>
- [7] Peeters J., Louarroudi E., De Greef D., et al. Time calibration of thermal rolling shutter infrared cameras. *Infrared Phys. Technol.*, 2017, vol. 80, pp. 145–152.

DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.001

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449516303309>

- [8] Демин С.А., Трошин Б.В., Жукова С.А. и др. Быстродействующий широкодиапазонный инфракрасный микроболометрической детектор. Патент 2574524С1 РФ. Заявл. 15.12.2014, опубл. 10.02.2016.
- [9] Жукова С.А., Турков В.Е., Демин С.А. и др. Чувствительные элементы инфракрасных систем технического зрения на основе микроболометрических матриц формата 640×480 пикселей. *Нано- и микросистемная техника*, 2017, т. 19, № 2, с. 105–113.
- [10] Schardt M., Rauscher M.S., Murr P J., et al. Messratenstatistischer Einzelspiegel-Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer bei Verwendung von Mikrobolometerdetektoren. *Technisches Messen*, 2017, vol. 84, no. 3, pp. 149–156. DOI: 10.1515/teme-2016-0043 URL: <https://www.degruyter.com/view/j/teme.ahead-of-print/teme-2016-0043/teme-2016-0043.xml>
- [11] Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-спектрометрии. М., Наука, 2014.

Остриченко Арина Александровна — студентка кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Морозов Андрей Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

DETERMINATION OF THE SENSITIVITY OF A MICROBOLOMETER CAMERA AS PART OF A FOURIER SPECTRORADIOMETER

A.A. Ostrichenko

arina.ostrichenko@gmail.com

SPIN-code: 3588-1749

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This article is devoted to the microbolometer camera, which represents an infrared radiation photodetector (PD), the authors carried out measurements of PD main parameters: sensitivity and signal-to-noise ratio (SNR) of the receiver. These values are used to set up the microbolometer camera modules in the device. The experimentally obtained camera sensitivity was 80 mK, which turned out to be worse than the declared one, and the SNR of the device, reduced to one degree, turned out to be 342. The dependence of the signal-to-noise ratio on the microbolometric camera shutter frequency was plotted. To confirm the efficiency the spectrum of ammonia was obtained and compared to the reference spectrum.

Keywords

Spectral analysis, photodetector, infrared radiation, microbolometer camera, discrete signals, low-frequency filters, microbolometric camera sensitivity

Received 29.05.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Svensson T., Bergström D., Axelsson L., et al. Design, calibration and characterization of a low-cost spatial Fourier transform LWIR hyperspectral camera with spatial and temporal scanning modes. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10644. DOI: 10.1117/12.2304628 URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10644/2304628/Design-calibration-and-characterization-of-a-low-cost-spatial-Fourier/10.1117/12.2304628.short>
- [2] Wang N., Wu J., Meng H., et al. Performance of a long-wave infrared Fourier Transform imaging spectrometer using a corner-cube Michelson interferometer and an uncooled microbolometer array. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9674. DOI: 10.1117/12.2197096 URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9674/1/Performance-of-a-long-wave-infrared-Fourier-Transform-imaging-spectrometer/10.1117/12.2197096.short>
- [3] Mikheev S.V. *Osnovy infrakrasnoy tekhniki [Fundamentals of infrared technique]*. Sankt-Petersburg, ITMO Publ., 2017 (in Russ.).
- [4] Bashkin S.V., Karfidov A.O., Kornienko V.N., et al. An imaging Fourier transform spectroradiometer with a multi-element photodetector for the spectral range of 7–14 mkm. *Optika i spektroskopiya*, 2016, vol. 121, no. 3, pp. 485–491. DOI: 10.7868/S0030403416090051 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0030403416090051> (in Russ.). (Eng. version: *Opt. Spectrosc.*, 2016, vol. 121, no. 3, pp. 449–454. DOI: 10.1134/S0030400X16090058 URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0030400X16090058>)
- [5] Schardt M., Schwaller C., Tremmela A.J., et al. Thermal stabilization of static single-mirror Fourier transform spectrometers. *Proc. of SPIE*, 2017, vol. 10210. DOI: 10.1117/12.2261924 URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference->

-
- proceedings-of-spie/10210/1/Thermal-stabilization-of-static-single-mirror-Fourier-transform-spectrometers/10.1117/12.2261924.short
- [6] Budzier H., Gerlach G. Calibration of uncooled thermal infrared cameras. *J. Sens. Sens. Syst.*, 2015, no. 4, pp. 187–197. DOI: 10.5194/jsss-4-187-2015 URL: <https://www.j-sens-sens-syst.net/4/187/2015/>
- [7] Peeters J., Louarroudi E., De Greef D., et al. Time calibration of thermal rolling shutter infrared cameras. *Infrared Phys. Technol.*, 2017, vol. 80, pp. 145–152. DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.001 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449516303309>
- [8] Demin S.A., Troshin B.V., Zhukova S.A., et al. Bystrodeystvuyushchiy shirokodiapazonnyy infrakrasnyy mikrobolometricheskoy detector [High-speed wideband IR microbolometer detector]. Patent 2574524S1 RF. Appl. 15.12.2014, publ. 10.02.2016 (in Russ.).
- [9] Zhukova S.A., Turkov V.E., Demin S.A., et al. Sensitive elements for the infrared machine vision systems based on microbolometer matrices of 640 x 480 pixel format. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystems Technology], 2017, vol. 19, no. 2, pp. 105–113 (in Russ.).
- [10] Schardt M., Rauscher M.S., Murr P J., et al. Messratenstatischer Einzelspiegel-Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer bei Verwendung von Mikrobolometerdetektoren. *Technisches Messen*, 2017, vol. 84, no. 3, pp. 149–156. DOI: 10.1515/teme-2016-0043 URL: <https://www.degruyter.com/view/j/teme.ahead-of-print/teme-2016-0043/teme-2016-0043.xml>
- [11] Morozov A.N., Svetlichnyy S.I. Osnovy fur'ye-spektroradiometrii [Fundamentals of Fourier-spectrometry]. Moscow, Nauka Publ., 2014 (in Russ.).

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

Scientific advisor — Morozov A.N., Dr. Sc. (Phys.-Mat.), Professor, Head of Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.