

Восстановление поля локальных температур пламени с применением томографического подхода с помощью пирометра спектрального отношения

В.С. Фланден^{1,2}, А.Ю. Поройков², Д.А. Голенцов¹
bossboskama3@mail.ru|poroykovay@gmail.com|dgoldan-00@mail.ru
¹ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия;
²НИУ «МЭИ», Москва, Россия

В работе представлен подход к восстановлению поля температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения. Прибор регистрирует интенсивность излучения от измеряемого пламени в нескольких спектральных диапазонах с использованием интерференционных фильтров и фотодиодов. Усиление сигнала происходит с помощью разработанного трансимпедансного усилителя. Пирометр определяет температуру путем измерения отношения интенсивности излучения в двух различных спектральных диапазонах. Амплитуда сигнала определяется путем интегрирования интенсивности излучения пламени по лучу зрения оптической системы пирометра. Измерение пламени с нескольких ракурсов позволяет получить преобразование Радона для этой области. Расчет обратного преобразования позволяет получить поле локальных температур пламени. В работе представлена экспериментальная установка по измерению локальных температур пламени и программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс измерения и восстанавливать томограммы температурных полей.

Ключевые слова: измерение высоких температур газа, пирометр спектрального отношения, томография температурных полей, преобразование Радона.

Reconstruction of Flame Local Temperature Field Using Tomographic Approach by Spectral Ratio Pyrometer

V.S. Flanden^{1,2}, A.Yu. Poroykov², D.A. Golentsov¹
bossboskama3@mail.ru|poroykovay@gmail.com|dgoldan-00@mail.ru
¹Central institute of aviation motors, Moscow, Russian;
²National research university "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian

The paper presents an approach to the reconstruction of the flame temperature field using a spectral ratio pyrometer. The device registers the intensity of the radiation from the measured flame in several spectral ranges using interference filters and photodiodes. Signal amplification occurs using the developed transimpedance amplifier. The pyrometer determines the temperature by measuring the ratio of the radiation intensity in two different spectral ranges. The signal is determined by integrating the intensity of the flame radiation along the optical system line of sight. Measurement of flame from several angles allows to get the Radon transform for this area. Calculation of the inverse transformation allows to obtain the field of local flame temperatures. The work presents an experimental setup for measuring flame local temperatures and software that allows to automate the measurement process and restore tomograms of temperature fields.

Keywords: high gas temperatures measurement, spectral ratio pyrometer, tomography of temperature, Radon transform.

1. Введение

Измерения температур элементов авиадвигателей и температур газового потока являются важной задачей при доводке разрабатываемых и эксплуатации промышленно выпускаемых агрегатов [1, 3, 5, 7, 14]. Такие измерения позволяют получить информацию о состоянии элементов двигателя и его важной характеристике – тяге. Эта задача может быть решена при помощи контактных методов измерения с использованием термопарных зондов. Однако использование контактных методов измерения приводит к внесению возмущений в исследуемую среду. А применение термопар затруднительно при достаточно высоких температурах (выше 2000 К) в связи с ограничением по рабочему диапазону. Для решения этой задачи широко применяются методы оптической пирометрии, так как они обладают двумя достоинствами: бесконтактностью и быстродействием [4, 10, 12].

Сложная структура газового потока влияет на точность интегрального способа (по лучу зрения) измерений из-за сложных соотношений спектральной излучательной и спектральной поглотительной способностей различных слоев газа с разными температурами. Использование метода измерения температуры по отношению интегральных

интенсивностей излучения в двух узких спектральных диапазонах (метод спектральных отношений) [9] позволяет избежать большого количества трудностей.

Среди оптических методов измерения температуры газа можно выделить наиболее простые: эмиссионный и абсорбционный. Второй метод является более сложным из-за необходимости установки дополнительного оборудования, что не всегда возможно [15, 18-19].

Одним из эмиссионных методов является метод измерения температуры газового потока по отношению спектральных линий двух компонентов его излучения. В этом случае отношение интенсивностей излучения не зависит от концентрации частиц, что и позволяет определять температуру. Такой метод реализован в виде компактного прибора, названного пирометром спектрального отношения (ПСО) [2, 8], который позволяет измерять температуру газа в диапазоне 1000-2500 К.

Важной задачей при доводке разрабатываемых и эксплуатации промышленно выпускаемых элементов авиадвигателей является проведение их испытаний с визуализацией получаемых результатов в виде температурного поля. Переход от локальных измерений к полевому позволяет получить специалистам качественно новую картину, выявить особенности исследуемых

процессов, которые могут быть использованы для усовершенствований конструкции авиадвигателей. Сравнение картин визуализации по сохраненным экспериментальным данным, полученным при различных вариантах исполнения агрегатов, позволяет легко определить оптимальный вариант.

Для измерения локальных температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения был выбран томографический подход. Это объясняется принципом работы пирометра, основанном на измерении интегральной интенсивности излучения по лучу зрения. Томография – совокупность методов, позволяющих по нескольким измерениям одной размерности восстановить распределение физической величины в размерности, на единицу больше.

Математической основой томографических методов является преобразование Радона [6]. Обратное преобразование Радона является сложным с вычислительной точки зрения и практически невозможным с точки зрения экспериментальных измерений, так как количество слоев и ракурсов, по которым происходит интегрирование, ограничено. Поэтому для расчета обратного преобразования Радона используются другие методы и алгоритмы. Одним из наиболее распространенных является алгоритм, основанный на использовании Фурье-преобразования (метод Фурье-синтеза) [16-17].

2. Пирометр спектрального отношения

В пирометре световой сигнал от измеряемого объекта через объектив фокусируется на входной торце коллекторного волоконного световода, разделяющего сигнал на три части, которые через интерференционные фильтры подаются на фотоприемники (рис. 1). Фототоки с фотоприемников проходят через усилители, выходные напряжения с которых подаются в блок сбора и обработки данных. Обработка полученных данных проводится на компьютере в реальном времени. Для ПСО выбраны интерференционные фильтры 1,38 мкм и 1,48 мкм с полушириной 0,025 мкм.

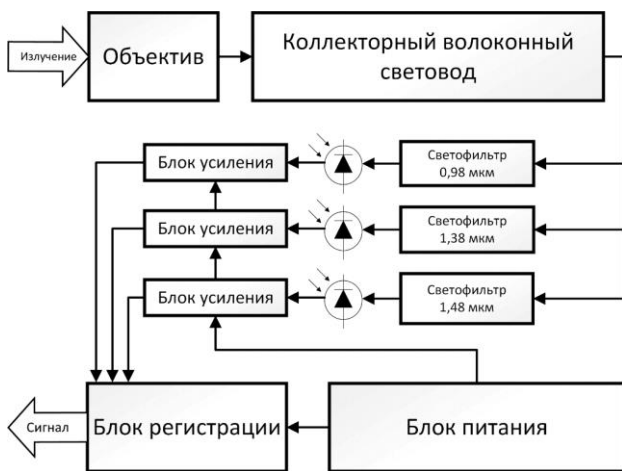


Рис. 1. Схема пирометра спектрального отношения.

Усиление сигнала с фотоприемников в пирометре проводится с помощью специально разработанного блока усиления. Именно он отвечает за величину отношения сигнал/шум, во многом определяющую погрешность измерений всего прибора. В приборе используются фотодиоды Hamamtsu G10899, работающие в фотогальваническом режиме. В качестве операционных усилителей в блоке усиления использованы микросхемы: Texas Instrumentals OPA2140 и Burr Brown PGA204.

В каждом канале сигнал с фотодиодов поступает на два трансимпедансных усилителя. С их выходов сигнал подается на операционный усилитель с программируемым коэффициентом усиления. В итоге блок усиления представляет собой инструментальный усилитель с дополнительным усилением на выходе.

Итоговый коэффициент преобразования ток-напряжение составляет от 0,94 МОм до 940 МОм в разных режимах усиления. Полоса пропускания от 11 кГц до 10 кГц. Максимальное выходное напряжение ±13,7 В.

3. Измерение температуры

При измерении температуры газового потока в газотурбинном двигателе основным компонентом в потоке сгоревшего углеводородного топлива является водяной пар, который удобно использовать в качестве тестового. Однако зарегистрировать излучение одной спектральной линии в колебательно-вращательном спектре водяного пара даже при использовании спектральных приборов высокой разрешающей силы для практического применения не представляется возможным ввиду того, что структура этой линии крайне сложна. Поэтому предложен другой метод регистрации излучения, основанный на регистрации группы линий, которые можно выделить с помощью узкополосных интерференционных фильтров.

Температура газового потока с помощью ПСО определяется по отношению интенсивностей излучения пламени в двух спектральных окнах. Спектральная интенсивность излучения, попадающего на фотоприемник пирометра и определяющая электрический сигнал одного канала пирометра, дается выражением

$$I(\lambda, T) = \int_{\lambda} \tau_i(\lambda) N_0(\lambda, T) k(\lambda, T) d\lambda,$$

где $N_0(\lambda T)$ – спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела,

$k(\lambda, T)$ – коэффициент поглощения водяного пара,

$\tau_i(\lambda)$ – спектральная чувствительность i -го канала пирометра, складывающаяся из коэффициента пропускания интерференционного фильтра, используемого для выделения спектральной полосы излучения водяного пара, и спектральной чувствительности фотоприемника. Для оптического тонкого слоя отношение спектральных интенсивностей излучения по двум каналам определяет градуировочную характеристику пирометра $\beta = I_{\lambda 1}/I_{\lambda 2}$, которая не зависит от характерного размера исследуемого потока и концентрации излучающих молекул, что и дает возможность измерять температуру. Пример сигнала, регистрируемого пирометром, и соответствующей ему температуры приведен на рис. 2.

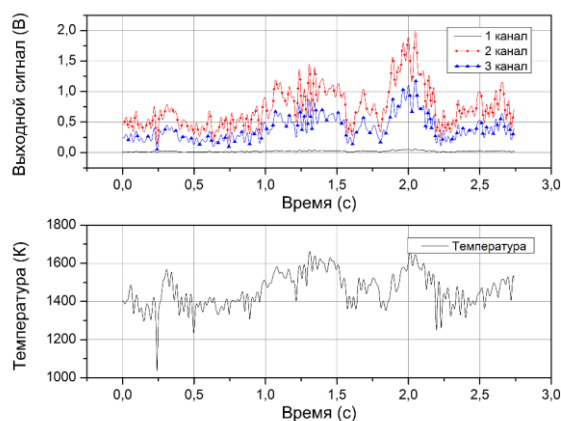


Рис. 2. Пример сигнала, регистрируемого пирометром, и соответствующей ему температуры.

4. Томографическая система измерений

Для построения системы измерений локальных температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения предлагается использовать схему, основанную на нескольких поворотных зеркалах (рис. 3) [9]. Одно зеркало является мультиплексирующим. Другие зеркала сканирующими – поворачиваясь вокруг своей оси, они производят сканирование лучом зрения пирометра по измеряемому полю температур. Мультиплексирующее зеркало стоит непосредственно на пути луча зрения и направляет его на одно из сканирующих зеркал.

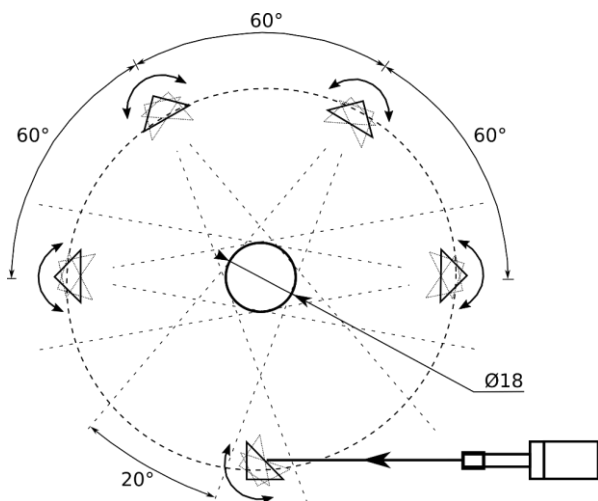


Рис. 3. Геометрическая схема построения томографической системы.

Для каждого положения зеркал в эксперименте измеряются значения сигналов с фотодиодов для двух длин волн: 1,38 мкм и 1,48 мкм. Локальные температуры рассчитываются с помощью томографического подхода.

Диаметр измеряемого поля составляет 100 мм, диаметр окружности, на которой расположены зеркала – 700 мм. Четыре сканирующих зеркала расположены примерно под углами 0°, 60°, 120° и 180° к оси абсцисс с одной стороны от исследуемого объекта и образуют трапецию.

Пятое зеркало играет роль мультиплексора, передавая оптический сигнал с одного из сканирующих зеркал на ПСО. Все зеркала расположены на окружности, центр которой лежит на оси исследуемого пламени. Разность оптического хода между верхним и нижним сканирующим зеркалом



Рис. 4. Газовая горелка на смеси изобутан/пропан (75/25), используемая в качестве объекта исследования.

составляет 180 мм. Угол сканирования каждого зеркала составляет около 20°.

Для управления системой было разработано специализированное программное обеспечение PyroTOMometer. Оно обеспечивает контроль над всеми компонентами системы и позволяет максимально автоматизировать процесс эксперимента и получения результатов измерения. Расположение сканирующих и мультиплексирующего зеркал, а также пирометра в пространстве на реальной установке задается с помощью графического интерфейса. Все результаты измерения автоматически сохраняются при помощи программного обеспечения, а графический интерфейс позволяет визуализировать сохраненные данные.

PyroTOMometer также обладает возможностью моделировать измерения. Для этого в графическом интерфейсе на схему добавляется температурное поле заданного распределения. Программа рассчитывает интегральный сигнал исходя из пространственного положения пирометра, зеркал и температурного поля. Изменение положения зеркал и расчет сигнала для каждого положения дает набор смоделированных экспериментальных измерений. На их основе рассчитываются температурные томограммы с помощью алгоритма Фурье-синтеза. Такой подход позволяет оценить результат измерений, меняя положения зеркал и шаг их поворота.

Другая возможность PyroTOMometer – проведение автоматической калибровки системы. На основе предварительных данных о положении элементов системы алгоритм рассчитывает оценочные углы поворота мультиплексирующего и измерительных зеркал. Далее измеряется сигнал пирометра во время сканирования измерительным зеркалом при нескольких значениях угла поворота мультиплексирующего зеркала. По максимуму сигнала пирометра определяется оптимальное положение мультиплексирующего зеркала относительно измерительного и диапазон углов для измерения последнего.

Эти две особенности PyroTOMometer позволяют оценить взаимное положение элементов системы в пространстве до проведения экспериментальных измерений, а также провести настройку системы в автоматическом режиме, без присутствия человека в непосредственной близости от испытуемого агрегата. Это позволяет снизить расходы во время проведения стендовых испытаний.

5. Экспериментальные исследования

В эксперименте использовался длиннофокусный объектив с расстоянием от объектива до зеркала 60 мм. Режим микрошага контроллера шаговых двигателей для мультиплексирующего зеркала равен 1/8, для сканирующих зеркал – 1/32.

В качестве объекта исследования была использована газовая горелка (рис. 4) на смеси изобутан/пропан (75/25). Горелка имеет частоту колебания несколько герц, из-за чего возникает колебание величин измеряемых сигналов. Для борьбы с этим негативным эффектом использовалось многократное сканирование одним зеркалом пламени с последующим усреднением измеренных значений и применением фильтра скользящего среднего к итоговому результату. Измерения проводились в плоскости, расположенной в 5-10 мм над верхней точкой горелки.

Для улучшения качества рассчитываемых томограмм проводилось их сглаживание и усреднение по нескольким измерениям. Пример томограммы первого канала после усреднения по 15-ти измерениям приведен на рис. 5.

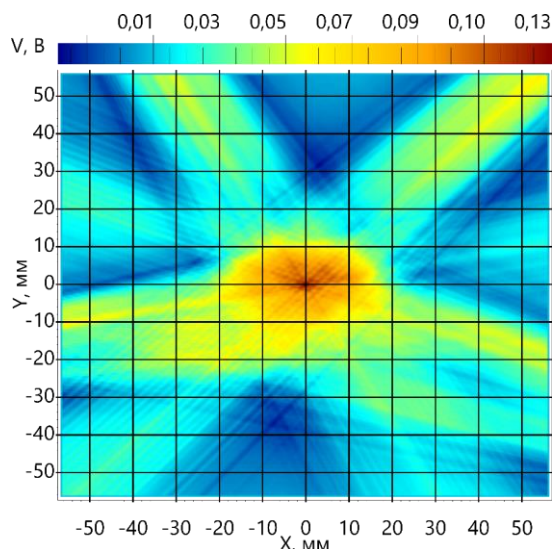


Рис. 5. Пример томограммы первого канала после усреднения по 15-ти измерениям.

Результат обработки имеет физический смысл: томограмма повторяет форму горелки с ярко выраженным максимумом, сдвинутым относительно центра. Этот сдвиг виден на рис. 4 и 5 и подтвержден визуальным наблюдением за пламенем горелки во время проведения эксперимента. Пример полученного температурного поля представлен на рис. 6.

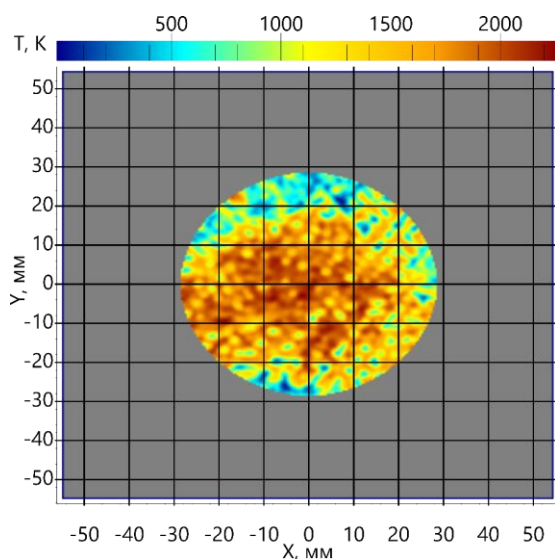


Рис. 6. Восстановленная томограмма распределения температуры в пламени горелки по результатам экспериментальных измерений.

6. Заключение

С помощью экспериментальных исследований была продемонстрирована возможность создания томографической системы измерений локальных температур пламени на основе пирометра спектрального отношения. Рассматриваемая система состоит из нескольких сканирующих зеркал, одно из которых является мультиплексирующим, передающим оптический сигнал с одного из сканирующих зеркал на ПСО, и самого пирометра. Все зеркала расположены на окружности, центр которой лежит на оси исследуемого пламени. Предложенная схема позволяет использовать всего один пирометр для визуализации поля температур пламени размером 50×50 мм. Размер визуализируемой области может быть легко

увеличен с помощью добавления зеркал и изменения геометрии их расположения.

Проведены экспериментальные исследования с помощью разработанной томографической системы на пламени газовой горелки. Измеренные температуры пламени лежат в диапазоне 1500-2300°K, что согласуется с теоретическими температурами горения изобутан-пропановой смеси [13]. Полученные результаты обработки качественно совпадают с ожидаемыми от конструкции газовой горелки температурными полями.

7. Литература

- [1] Авиационные правила - 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории – Межгосударственный авиационный комитет, ОАО «АВИАИЗДАТ», 2009. 274 с.
- [2] Алиходжина Н.В., Фланден В.С., Аникин К.А. Пирометр и пламя // Наука сегодня: фундаментальные и прикладные исследования. Материалы международной науч.-практ. конференции. В двух частях. 2017. С. 24-26.
- [3] Бакулев В.И., Голубев В.А., Нечаев Ю.Н. и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / под ред. В.А. Сосунова, В.М. Чепкина. М.: МАИ, 2003. 688 с.
- [4] Голенцов Д.А., Романов В.Б., Сахаров В.Б. Пирометр спектрального отношения для определения температуры газовых потоков // Оптические методы исследования потоков: Труды VIII Межд. науч.-технич. конференции. М.: Изд-во ЗАО Фирма «Знак», 2005. С. 178-181.
- [5] Дьяченко Н.Х., Батулин С.А., Ложкин В.Н. Метод высокотемпературной пирометрии пламени в дизеле // Двигатели внутреннего сгорания. М.: НИИинформтяжмаш, 1977. № 4-77-14. С. 12-14.
- [6] Левин Г.Г., Вишняков Г.Н. Оптическая томография. М.: Радио и связь 1989. 224 с.
- [7] Новиков В.Н., Сахаров В.Б., Смирнов Л.И. Пирометр спектрального отношения // Измерительная техника. 1987. № 12. С. 42-43.
- [8] Поройков А.Ю., Сахаров В.Б. Пирометр спектрального отношения для измерения высоких температур в газовых потоках // Приборы и техника эксперимента. №6, 2016. С. 131-132.
- [9] Поройков А.Ю., Фланден В.С., Лапицкий К.М. Томографическая система измерения локальных температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения // Приборы и техника эксперимента. № 1, 2019. С. 110-116.
- [10] Похлебаев Д.В., Саенко Г.И., Клевцев К. В. Пирометр спектрального отношения // Информационные и измерительные системы и технологии. Сборник научных статей по материалам Международной научно-технической конференции. 2016. С. 83-87.
- [11] Сахаров В.Б., Садовин М.А., Поройков А.Ю. Особенности определения высокой температуры газового потока пирометром спектрального отношения // АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА. Москва 24-27 ноября 2015 г. Сборник тезисов докладов. М.: ЦИАМ, 2015. С. 813-815.
- [12] Сеньков А.Г., Фираго В.А. Оптимизация характеристик пирометров спектрального отношения // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2009. № 1. С. 47-54.
- [13] Фролов Ю.В. (ред.) Теория горения и взрыва. Т. 1. М.: Наука, 1981. 412 с.
- [14] Фрунзе, А.В. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения // Фотоника, 2009. № 4 -С. 32-37.
- [15] Cai W., Kaminski C. F. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows// Progress in Energy and Combustion Science. 2017. Vol. 59. P. 1-31.

- [16] Hsieh J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA: SPIE, 2009. 562 pp.
- [17] Kak A. C., Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001. 329 pp.
- [18] Kranendonk L.A., Caswell A.W., Hagen C.L., Neuroth C.T., Shouse D.T., Gord J.R., Sanders S.T. Temperature measurements in a gas-turbine-combustor sector rig using swept-wavelength absorption spectroscopy // Journal of Propulsion and Power. 2009. Vol. 25. №. 4. P. 859-863.
- [19] Wang F., Wu Q., Huang Q., Zhang H., Yan J., Cen K. Simultaneous measurement of 2-dimensional H₂O concentration and temperature distribution in premixed methane/air flame using TDLAS-based tomography technology // Optics Communications. 2015. Vol. 346. P. 53-63.

Об авторах

Фланден Вячеслав Сергеевич, ассистент кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», младший научный сотрудник отдела «Измерительной техники и метрологии» ЦИАМ им. П.И. Баранова. E-mail: bossboskama3@mail.ru.

Поройков Антон Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ». E-mail: rogoukovay@gmail.com.

Голенцов Дмитрий Анатольевич, к.ф.-м.н, начальник сектора отдела «Измерительной техники и метрологии» ЦИАМ им. П.И. Баранова E-mail: dgoldan-00@mail.ru.