

Дистанционное измерение распределения температуры с использованием мультиспектральной камеры

И.Б. Кутуза, П.В. Зинин, К.М. Булатов, П.А. Гришаев

*Научно-технологический центр Уникального приборостроения РАН
117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 15
E-mail: kutuza@mail.ru*

Представлен новый метод быстрого измерения поверхностного распределения температуры на основе восьмицветной видеокамеры. Частота измерений – 80 Гц. Разработан математический аппарат определения распределения температуры по поверхности нагретого тела, находящейся в поле зрения камеры. Важной особенностью метода является то, что вычисление температуры в каждой точке производится без использования данных об излучательной способности. Статистическая ошибка измерений температуры при значении 1170 К составляет 10 %, а при значении 1500 К – 3 %. Показано, что метод мультиспектрального измерения работоспособен и позволяет получать поверхностные распределения температур объектов неизвестного состава.

Ключевые слова: дистанционное измерение температуры, динамическое измерение, распределение поверхностной температуры, мультиспектральная видеокамера

Remote measurement of temperature distribution using a multispectral camera

I.B. Kutuza, P.V. Zinin, K.M. Bulatov, P.A. Grishaev

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences.

A new method for rapid measurement of surface temperature distribution based on an eight-color video camera is presented. The measurement frequency is 80 Hz. A mathematical apparatus for determining the temperature distribution over the surface of a heated body located in the field of view of the camera has been developed. An important feature of the method is that the temperature at each point is calculated without using data on the emissivity. The statistical error of temperature measurements at a value of 1170 K is 10%, and at a value of 1500 K – 3%. It is shown that the multispectral measurement method is efficient and allows obtaining surface temperature distributions of objects of unknown composition.

Keywords: remote temperature measurement, dynamic measurement, surface temperature distribution, multispectral video camera

Введение

Динамическое измерение поверхностного распределения температуры (T) нагретых тел с неизвестным коэффициентом излучения ε востребовано во многих областях науки и техники, включая геофизику [1], синтез новых материалов, изучение фазовых переходов [2, 3] и т.д. На сегодняшний день для определения распределения T объектов с неизвестным ε применяются методы спектральной пирометрии, а именно: гиперспектральной и мультиспектральной пирометрии и спектрального отношения. Было показано, что использование двойного перестраиваемого акустооптического (АО) фильтра в сочетании с монохромной видеокамерой позволяет проводить измерение распределения T путём регистрации спектров теплового излучения объекта во всех

точках поверхности объекта с последующим сравнением их с кривой Планка. К сожалению, этот метод не подходит для исследования быстрых тепловых процессов, таких как фазовые переходы, плавление и т.д., поскольку типичное время экспозиции камеры при измерении распределения T с использованием двойного перестраиваемого АО фильтра варьируется от 0,5 до 0,1 с. Соответственно, если за это время распределение T заметно изменяются, то измерения дают значительные ошибки значений T на температурной карте, что делает невозможным измерение динамики быстрых изменений распределения T . Пирометры спектрального отношения лишены этих недостатков, но они применимы, если спектр излучения измеряемого тела близок к спектру излучения чёрного тела, т.к. в этих приборах по двум измерениям проводится определение двух неизвестных величин, а именно ε и T . По этой причине измерения спектрального отношения с помощью пирометров сопряжены с большими погрешностями измерений.

Цель представляемой работы состояла в разработке нового метода быстрого измерения поверхностного распределения температуры T на основе восьмицветной видеокамеры. В такой камере в каждом пикселе содержится восемь спектральных каналов, что позволяет определять распределение T нагретого тела по восьми независимым измерениям кривой Планка

Описание метода

Дистанционное измерение T основано на использовании закона Планка [4], описывающего спектр электромагнитного излучения тела, нагретого до температуры T . Предполагается, что ε не зависит от λ . Хотя тел, для которых это предположение выполняется, называемых «серыми», не существует. Однако во многих участках спектра условие постоянства ε выполняется [5], и далее условие серости будем считаться выполненным. Суть метода заключается в нахождении таких значений $T = T_0$ и $\varepsilon = \varepsilon_0$, для которых сумма квадратов отклонений N измеренных значений $I(\lambda_i)$ от соответствующих теоретических, была бы минимальной (двумерная нелинейная минимизация). В случае восьмицветной камеры излучение фильтруется в восьми каналах с известной спектральной зависимостью. Все каналы имеют один или несколько пиков на λ 584, 616, 654, 696, 733, 753, 770 и 825 нм, причём в длинноволновой области имеет место заметное наложение спектров.

Согласно работе [6], поиск минимума для метода наименьших квадратов может упрощать то, что ε входит в уравнение линейно. Проблема определения температуры возможно свести к одномерному поиску минимума суммы квадратов отклонений по параметру T (одномерная минимизация).

Обсуждение

Для проверки метода была собрана экспериментальная установка. В качестве образца для изучения точности метода использовалась светоизмерительная лампа СИ-6-100 с вольфрамовой ленточной нитью, нагреваемой электрическим током.

Результаты вычисления распределения T ленты лампы при разных значениях тока, показали неоднородности, возникающие из-за отвода тепла через крепления спирали на её краях. Поэтому при определении T рассматривалась лишь центральная часть ленты, имеющая наибольшую T .

Определение T по данным, полученным в 8-ми спектральных каналах, осуществлялось с использованием написанной в среде «Matlab» программы, алгоритм которой построен на одномерной минимизации. Используя критерий Фишера [7], доверительный интервал вычисляется по формуле $S(T) = S(T_0)[1+p/(n-p) \times F(n, p, \alpha)]$, где $F(n, p, \alpha)$ – параметр Фишера, α – доверительная вероятность, n – число измерений, p –

количество параметров (в данных экспериментах $n=$, $p=2$). При токе $I=11,6$ А $T=1283$ К, а доверительный интервал по уровню $0,95 \Delta T_{0,95} = \pm 64$ К.

Определённая зависимость температуры лампы от величины тока демонстрирует в целом монотонный рост. При этом величина погрешности падает с ростом температуры: с 10 % при $T=1170 \pm 112$ К до 3 % при $T=1540 \pm 46$ К. Одновременно T измерялась яркостным пирометром «Проминь М», обеспечивающим погрешность менее 1 % для тел с известным коэффициентом излучательной способности ε .

Выводы

Измерения показали хорошее соответствие между собой значений T , полученных двумя методами. Снижение относительной ошибки измерений с ростом T выглядит необычно, поскольку теоретические оценки [8] предсказывают обратное поведение. Объяснение связано с тем, что спектральные кривые каналов (рис. 1) сильно перекрываются в длинноволновой области (> 650 нм), а потому точность определения спектральных данных по результатам измерений такой мультиспектральной камерой зависит от спектрального положения максимума планковского спектра. С ростом температуры T спектр теплового излучения смещается в область коротких λ , где взаимное наложение спектральных каналов меньше. Сравнение характеристик мультиспектрального метода на основе восьмицветной камеры и метода с использованием гиперспектральной 80-канальной системы на базе АО фильтров показало следующее. Погрешности обоих методов примерно одинаковы: 46 и 49 К соответственно. При этом частота получения данных видеокамерой в 40 раз превышает частоту АО системы – 2 Гц [9]

Высокоскоростная цветовая видеокамера уже использовалась в методе бесконтактной двухцветной пирометрии для измерения быстрых изменений T поверхности топливных гранул [10], и было достигнуто разрешение по времени 2 мс. Однако этот метод применим только при известном значении ε образца.

Заключение

Исследованный новый метод измерения поверхностного распределения T на основе восьмицветной видеокамеры позволяет получать данные с частотой до 80 Гц. Погрешность измерений T составляет 3–10%, что подтверждено измерениями с использованием яркостного пирометра. Обработка данных проводится с помощью разработанного математического аппарата, реализованного программно, после завершения регистрации всего временного ряда. Высокая скорость получения распределения T нагретых тел при сравнительно невысокой погрешности измерений T делают предложенный метод перспективным для исследования быстропротекающих процессов, происходящих при нагреве твёрдых тел лазерами, таких как плавление и фазовые переходы [1, 11].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук. (FFNS-2025-0007). Экспериментальная часть работы выполнена с использованием оборудования уникальной научной установки «Лазерный нагрев в ячейках высокого давления» НТЦ УП РАН [НТИРФ ID: 507563, <https://unu.ntcup.ru/>].

Литература

1. Bulatov K.M., Semenov A.N., Bykov A.A., Machikhin A.S., Litas ov K.D., Zinin P.V., Rashchenko S.V. Measurement of thermal conduc tivity in laser-heated diamond anvil cell using radial temperature distri bution // High Pressure Research. – 2020. – Vol. 40, No. 3. – P. 315–324.
2. Popov M. Yu., Churkin V.D., Kulnitskiy B., Kirichenko A.N., Bula tov K.M., Bykov A.A., Zinin P.V., Blank V. Transformation of diamond to fullerene-type onions at pressure 70 GPa and temperature 2400 K // Na notechnology. – 2020. – Vol. 31(31). – Art.n. 315602.
3. Takemura K., Yusa H., Eremets M.I., Shekar N.V.C. Materials syn thesis at high pressures in the laser-heated diamond-anvil cell // Euro pean Journal of Solid State and Inorganic Chemistry. – 1997. – Vol. 34, No. 7–8. – P. 657–668.
4. Magunov A.N. Spectral pyrometry (Review) // Instruments and Ex perimental Techniques. – 2009. – Vol. 52, No. 4. – P. 451–472.
5. Magunov A.N. The choice of a spectral interval within which a heated opaque object radiates as a gray body // Instruments and Experi mental Techniques. – 2010. – Vol. 53, No. 6. – P. 910–914.
6. Bulatov K.M., Mantrova Y.V., Bykov A.A., Gaponov M.I., Zinin P.V., Machikhin A.S., Troyan I.A., Batshev V.I., I.B. Kutuza I.B. Multi-spectral image processing for the measurement of spatial temperature distribution on the surface of the laser heated microscopic object // Computer Optics. – 2017. – Vol. 41, No. 6. – P. 864–868.
7. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis / 3 rd ed. – New York: John Wiley & Sons Inc, 1998. – 736 p.
8. Мантрова Ю.В., Зинин П.В., Булатов К.М., Быков А.А. Изме рение распределения коэффициента излучения и температуры по поверхности вольфрама, нагретого излучением мощного лазера // Оп тический журнал. – 2020. – Т. 87, № 11. – С. 10–20.
9. Zinin P.V., Bykov A.A., Machikhin A.S., Troyan I.A., Bulatov K.M., Mantrova Y.V., Batshev V.I., Gaponov M.I., Kutuza I.B., Rashchenko S.V., Prakapenka V.B., Sharma S.K. Measurement of the temperature distri bution on the surface of the laser heated specimen in a diamond anvil cell system by the tandem imaging acousto-optical filter // High Pres sure Research. – 2019. – Vol. 39, No. 1. – P. 131–149.
10. Glushkov D.O., Egorov R.I., Klepikov D.M. High-speed contact less measurements of temperature evolution during ignition and combus tion of coal-based fuel pellets // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 175. – Art.n. 121359.
11. Bulatov K.M., Zinin P.V., Bykov A.A. Determination of the Melt ing Point of Solids by the Imaging Acousto-Optical Filter // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – Vol. 14, No. 5. – P. 1092–1096.