

МОДЕЛЬ ПРОТЯЖЕННОГО АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2009 г. В. Н. Васильев*; И. Ю. Дмитриев*, канд. техн. наук; С. В. Тихонов**, канд. техн. наук

* Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: electron@niiki.ru

Представлено описание опытного образца модели протяженного абсолютно черного тела (АЧТ), предназначенного для проведения энергетической калибровки оптико-электронных приборов дистанционного зондирования Земли. Приведены результаты расчетов и экспериментальных оценок параметров и характеристик разработанной модели, подтверждающие перспективность ее использования при проведении калибровок.

Ключевые слова: протяжённое абсолютно чёрное тело, динамика нагрева, краевой эффект.

Коды OCIS: 120.5630

Поступила в редакцию 04.05.2009

Основным назначением приборов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является формирование изображения наблюдаемых сцен в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра путем регистрации теплового собственного и отраженного излучения подстилающей поверхности Земли. Для получения высокого пространственного и температурного разрешения в изображении наблюдаемых сцен современные оптико-электронные приборы базируются на охлаждаемых многоэлементных фотоприемных устройствах с минимальным размером фоточувствительного элемента и максимальным отношением сигнал/шум на выходе считывающей микроэлектроники. Совокупность низкой рабочей температуры, “малошумящей” электронной схемы считывания фоточувствительного элемента позволяет реализовывать режим ограничения фоном (ОФ-режим) при работе фотоприемного устройства (ФПУ) в ИК диапазоне длин волн [1]. В данном режиме пороговые характеристики фотоприемного устройства определяются флуктуациями фонового излучения.

В общем случае сигнал на выходе каждого из каналов фотоприемного устройства, входящего в состав оптико-электронного прибора (ОЭП) ДЗЗ, представляет собой сумму сигналов от излучения

фона, регистрируемого источника излучения и внутренних (приборных) источников [2, 3]. По мере эксплуатации ОЭП значения составляющих сигнала могут изменяться, например, фоновая составляющая зависит от температуры элементов оптической системы, постоянно находящихся в поле зрения чувствительного элемента фотоприемного устройства, внутренняя (приборная) составляющая сигнала определяется рабочей температурой чувствительного элемента и ее изменениями, а также нестабильностью работы электронных схем фотоприемного устройства. Данные изменения составляющих сигнала требуют проведения периодических калибровок основных фотоэлектрических параметров прибора, к которым относятся вольтовая чувствительность, удельная обнаружительная способность и постоянная составляющая сигнала при отсутствии полезного сигнала для каждого из элементов ФПУ.

Калибровка подразумевает создание известного уровня облученности на входном зрачке оптической системы оптико-электронного прибора и измерение сигналов на выходе чувствительных элементов фотоприемного устройства ОЭП. Обычно калибровка проводится в два этапа: при отсутствии полезного сигнала (оптическая

система направляется на источник излучения с низкой температурой, т. е. в космическое пространство), при наличии сигнала известной величины (модель АЧТ) [4]. На первом этапе определяются пороговые характеристики и постоянная составляющая сигнала на выходе каждого чувствительного элемента, на втором этапе измеряется свет-сигнальная характеристика и рассчитывается вольтовая чувствительность элементов.

Для проведения калибровки оптико-электронных приборов ДЗЗ используются специальные модели абсолютно черных тел с протяженной излучающей поверхностью, которые размещаются вблизи входного зрачка оптической системы прибора и создают на нем известный уровень облученности в рабочем спектральном диапазоне длин волн ОЭП [5]. Размер излучающей поверхности модели АЧТ должен быть больше чем размер входного зрачка оптической системы для создания равномерной облученности на входном зрачке, соответствующей характеру облученности от объекта, с которым работает ОЭП.

В данной статье рассматривается разработанный авторами опытный образец модели протяженного АЧТ для проведения калибровки оптико-электронного прибора ДЗЗ. Модель АЧТ должна обеспечивать выполнение следующих технических требований: диапазон рабочих температур излучающей поверхности модели АЧТ от +20 °С до +55 °С, коэффициент излучательной способности в спектральном диапазоне длин волн 2–12 мкм не менее 0,9, диаметр излучающей поверхности не менее 350 мм, разброс температуры по излучающей поверхности ± 1 °С. Модель АЧТ предназначена для эксплуатации в условиях вакуума и низких температур.

На предварительном этапе разработки были проведены тепловые расчеты, которые включали в себя оценку таких основных факторов для обоснования выбора элементов конструкции модели АЧТ как

– динамика нагрева излучающей поверхности, что важно для выбора материала и габаритов излучающей пластины, а также оценки потребляемой мощности;

– влияние топологии нагревательного элемента на разброс температуры по площади излучающей поверхности, что определяет форму нагревательного элемента, технологию его закрепления к излучающей пластине (дополнительно была повторена оценка динамики нагрева для случая дискретного нагревателя);

– источники возникновения неравномерности температуры по излучающей поверхности и методы компенсации их влияния.

Для проведения расчетов были составлены соответствующие одномерные и двумерные нестационарные тепловые модели, определены граничные условия и получены решения данных задач с использованием численных методов. Результаты расчетов приведены на рис. 1–3.

На рис. 1 представлен график динамики нагрева излучающей поверхности модели АЧТ при заданном уровне потребляемой нагревательным элементом мощности. Очевидно, что чем меньше объемная теплоемкость материала излучающей пластины и меньше ее толщина, тем выше динамика нагрева и меньше потребляемая мощность. Однако очень малая толщина пластины приводит к возникновению неравномерности нагрева различных участков пластины из-за технологического допуска на толщину. Соответственно условием, определяющим параметры излучающей пластины, становится именно этот допуск.

Результаты расчетов неравномерности температуры по излучающей поверхности модели АЧТ, вызванные дискретностью нагревательного элемента, в виде графика представлены на рис. 2. График демонстрирует изменение во времени разности температур участков излучающей поверхности, контактирующих с нагревателем – t_2 , и тех участков поверхности, где нагреватель отсутствует – t_1 . Основное условие, которое выдвигается при создании нагревательного элемента – это максимальное заполнение нагревателем площади излучающей поверхности. Расчеты

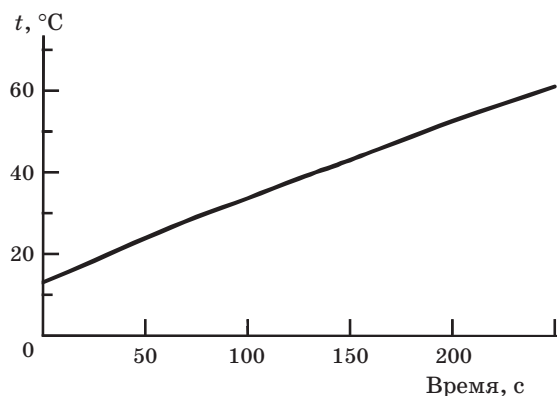


Рис. 1. Динамика нагрева излучающей поверхности модели АЧТ (потребляемая электрическая мощность нагревателя 30 Вт, толщина пластины 1,5 мм, материал пластины – алюминиевый сплав Д16).

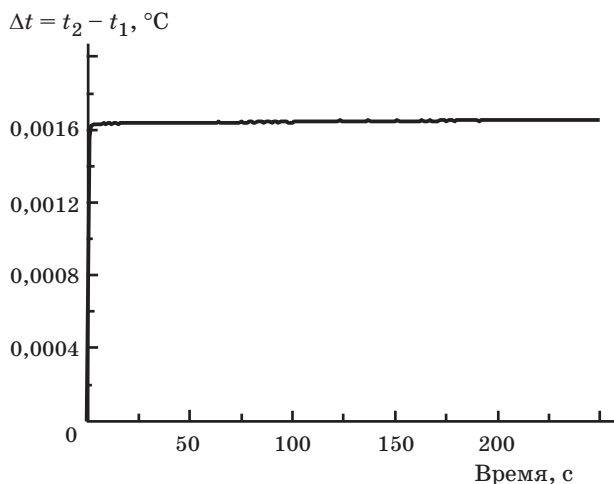


Рис. 2. Изменение разности температур излучающей поверхности при форме нагревателя в виде “змейки” с шириной полосы 10 мм, расстоянием между полосами 1 мм и толщиной пластины 1,5 мм в процессе нагрева излучающей поверхности.

продемонстрировали, что при достаточно легко реализуемой форме нагревателя в виде “змейки” с заданными размерами полос нагревателя и промежутками между полосами достигается высокая равномерность температуры по излучающей поверхности модели АЧТ в течение времени нагрева.

Основным источником возникновения неравномерности температуры по излучающей поверхности модели АЧТ являются краевые эффекты, возникающие на границах излучающей пластины. При анализе влияния краевых эффектов были получены численные результаты (рис. 3) изменения температуры (0,12 °C при толщине пластины 1,0 мм, 0,14 °C при толщине 1,5 мм). Если краевой эффект оценить через перепад температуры излучающей поверхности у торца пластины и на очень значительном удалении от торца, и зоной влияния краевого эффекта назвать область, за пределами которой он уже не превышает 5% от максимального значения, то вся излучающая поверхность модели АЧТ находится под влиянием краевого эффекта. Однако разброс температуры, вызываемый данным эффектом, находится в требуемых пределах.

Проведенные расчеты доказали принципиальную возможность создания модели АЧТ, на их основании был разработан и создан опытный образец модели протяженного АЧТ. Общий вид образца показан на рис. 4.

Модель АЧТ представляет собой тонкую (1,500 мм ± 0,015 мм) пластину из алюминиевого сплава, на одну из поверхностей которой наклеен нагревательный элемент, а вторая является рабочей излучающей поверхностью. Для повышения коэффициента излучательной способности излучающая поверхность пластины подвергалась химическому оксидированию, затем на нее наносилась специальная черная матовая эмаль (подобная краска используется в космической технике для покраски внутренних поверхностей бленд и прочих поглощающих излучение поверх-

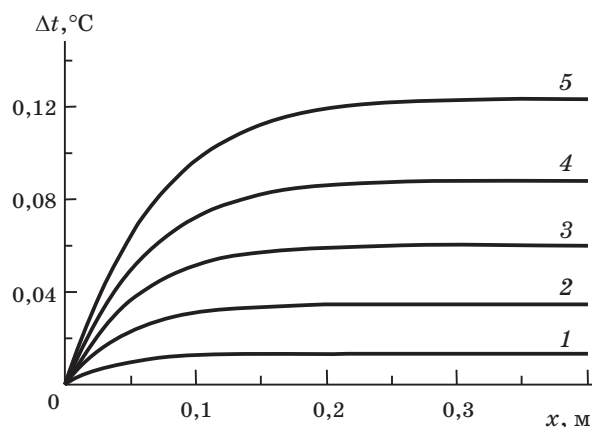


Рис. 3. Распределение температуры по площади излучающей поверхности модели АЧТ, вызванное эффектами на границе излучающая поверхность/окружающая среда. 1 – $T_{\text{АЧТ}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{окр. среды}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_{\text{АЧТ}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_{\text{АЧТ}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $T_{\text{АЧТ}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 – $T_{\text{АЧТ}} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

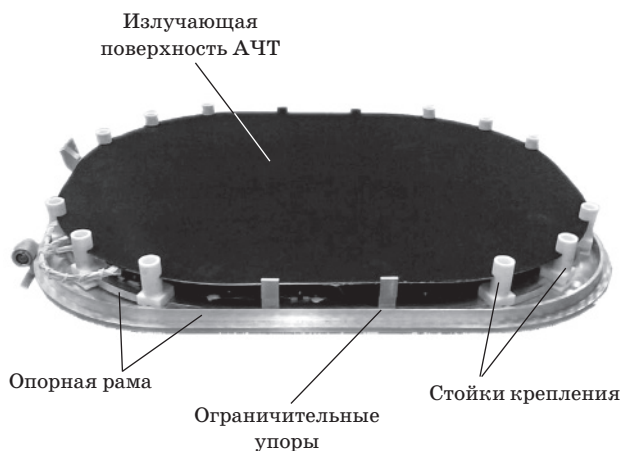


Рис. 4. Общий вид модели АЧТ.

ностей). Таким образом, достигается высокий коэффициент излучательной способности излучающей поверхности в рабочих областях длин волн – не менее 0,9.

Нагревательный элемент представляет собой полиамидную пленку, в которой располагается нагреватель, выполненный в виде “змейки” из медной фольги толщиной 80 мкм. Закрепление нагревательного элемента на пластине излучателя выполняется клеем. Предельная мощность такого типа нагревателя ограничивается значением 1000 Вт/м². Учитывая размеры нагревателя модели АЧТ, потребляемая мощность не должна превышать 135 Вт (предельный ток потребления 5 А при напряжении питания 27 В). Все материалы, используемые в нагревателе, могут эксплуатироваться в вакууме при температурах окружающей среды от –50 °С до +105 °С. Элементом конструкции, наиболее подверженным температурному воздействию, является клей, соединяющий слои пленочного нагревателя.

Для определения температуры излучающей поверхности модели АЧТ используются термодатчики, закрепленные на пластине излучателя. Применяются два типа термодатчиков: термосопротивление ТЭМ-006 и дифференциальные термопары (медь-константан-медь). “Горячие” спаи термопар размещены по краям и в центре излучающей поверхности модели АЧТ, “холодные” спаи установлены на излучающей поверхности в непосредственной близости от места установки термосопротивления. Температура излучающей поверхности модели АЧТ определяется по показаниям термосопротивления, эта же температура приписывается “холодным” спаям дифференциальных термопар. Результаты измерений разностного сигнала дифференциальных термопар характеризуют разброс температур на различных участках излучающей поверхности модели АЧТ.

Модель АЧТ закрепляется в опорных стойках, которые установлены на раме. Стойки выполнены из фторопласта и обеспечивают температурную развязку излучателя от металлической рамы основания.

Поддержание температуры излучающей поверхности модели АЧТ на заданном уровне осуществлялось с помощью электронного блока управления, который, используя широтно-импульсное модулирование напряжения питания нагревательного элемента, обеспечивал поддержание температуры на уровне ±0,1 °С. При подаче максимальной мощности на нагре-

вательный элемент время нагрева излучающей пластины до + 50 °С не превысило 2 минут.

Для оценки параметров и характеристик разработанного образца модели АЧТ были проведены измерения неравномерности температуры по излучающей поверхности пластины. При измерениях сигнал, формируемый излучением от небольшого участка излучающей поверхности модели АЧТ, регистрировался с помощью фотоприемного устройства на основе фотодиода PtSi (размер чувствительного элемента 30×30 мкм, рабочая температура 70 К, область спектральной чувствительности 2–4 мкм). Размер участка излучающей поверхности модели АЧТ, просматриваемый ФПУ, имел диаметр 1 мм.

Разброс температур ΔT излучающей поверхности модели АЧТ приравнялся к разнице максимального и минимального измеренных значений температуры излучающей поверхности

$$\Delta T = \pm 0,5(T_{\max} - T_{\min}). \quad (1)$$

На рис. 5 изображены графики распределения температуры по излучающей поверхности модели АЧТ вдоль вертикальной оси Y и горизонтальной оси X , полученные в нормальных атмосферных условиях. Разброс температур составил ± 1 °С, и объясняется, в основном, влиянием атмосферной конвекции, что подтверждается результатами измерений. Графики 2 и 3, изображенные на рис. 5, демонстрируют распределение температуры по излучающей поверхности модели АЧТ для двух положений излучающей поверхности в вертикальной плоскости. Видно, что распреде-

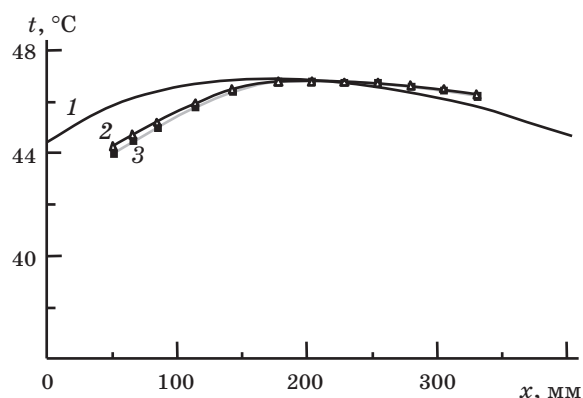


Рис. 5. Распределение температуры по излучающей поверхности модели АЧТ относительно центра. 1 – горизонтальное направление, 2 – вертикальное направление, 3 – вертикальное направление, излучающая поверхность модели АЧТ развернута на 180°.

ление температур для этих положений практически совпадает.

В настоящее время идет подготовка экспериментов по оценке параметров опытного образца модели АЧТ (температурной равномерности, стабильности рабочей температуры и коэффициента излучательной способности) в условиях вакуума.

Таким образом, предложенная технология формирования протяженной равномерно излучающей поверхности позволяет создавать имитаторы АЧТ, отличающиеся достаточно высокими значениями равномерности температуры и коэффициента излучательной способности в пределах значительной площади излучающей поверхности, стабильностью температуры этой поверхности во времени, что в совокупности с хорошими эксплуатационными качествами (динамика нагрева, масса, потребляемая электрическая мощность, срок службы) позволяет использовать такие имитаторы в бортовых устройствах для калибровки ОЭП ДЗЗ, а также для создания рабочих эталонных источников излучения (моделей АЧТ) для стендовых испыта-

ний, исследований и энергетической калибровки ОЭП различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: изд-во Мир, 1972. 500 с.
2. Пономаренко В.П., Филачев А.М. Фотоприемники и фотоприемные модули нового поколения // Прикладная физика. 2001. № 6. С. 20–38.
3. Осипов В.В., Пономаренко В.П., Селяков А.Ю. Предельные характеристики новых смотрящих гибридных ИК-матриц на основе HgCdTe // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 16–25.
4. Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Горбунов Г.Г., Романовский А.С., Городецкий А.К. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли // Сборн. докл. междунар. конф. МСАР-2006. СПб., 2006. С. 224–230.
5. Беднов С.М., Головин Ю.М. Вопросы создания объединенного метрологического центра коллективного пользования для калибровки ИК аппаратуры ДЗЗ // Сборн. докл. междунар. конф. МСАР-2006. СПб., 2006. С. 163–169.