

*На правах рукописи*



**Афанасьев Александр Вячеславович**

**ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИК РАДИОМЕТРИЯ  
ЛОКАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ  
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ  
ИЗЛУЧАЕМЫХ МОЩНОСТЕЙ**

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2007

Работа выполнена на кафедре радиотехники радиофизического факультета  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Орлов Игорь Яковлевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
Профессор Якимов Аркадий Викторович,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Вакс Владимир Лейбович.

Ведущая организация: ФГУП “ФНПЦ Научно исследовательский  
институт измерительных систем им.  
Ю.Е.Седакова”

Защита состоится “23” \_\_\_\_\_ мая \_\_\_\_\_ 2007г. в 13 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном  
университете им. Н.И.Лобачевского ( 603950 г.Нижний Новгород, ГСП-20,  
пр.Гагарина, 23, корп. 1 , ауд. 420).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского.

Автореферат разослан “ 7 ” \_\_\_\_\_ апреля \_\_\_\_\_ 2007г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета доцент



Черепенников В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Для контроля физических и технологических процессов широко используются радиофизические методы измерений параметров, характеризующих как динамику процессов, так и их качество. Учитывая, что большинство физических и химических процессов сопровождаются изменением собственной температуры объекта, одним из наиболее используемых, является контроль температурных режимов.

Условия, в которых используется современный радиометр для контроля физических экспериментов и технологических процессов могут выглядеть следующим образом: измерение температуры объекта в широком диапазоне (от отрицательных до нескольких тысяч градусов ) с расстояния от 10 мм до 10 метров, с учетом внешних факторов (пыль, рентгеновское излучение, широкий диапазон внешних температур и др.) и особенностей самого объекта измерения (излучательная способность, характер поверхности, размеры и т.д.). Таким образом, возникает необходимость в решении задачи эффективного измерения мощности ИК излучения объекта в широком динамическом диапазоне мощностей, как информативного излучения, так и излучения, являющегося помехой.

При создании радиометров для измерения температуры высокотемпературных процессов, медико-биологических исследований, для физических измерений в ближней зоне радиометра, возникают следующие внешние мешающие факторы:

- диаграмма направленности оптической системы в ближней зоне не сформирована;
- внешние факторы (запыление оптической системы парами металла, при контроле термической обработке металлов);
- помеха, связанная с приемом фонового (мешающего) ИК излучения;
- внешние механические воздействия на радиометр;
- нагрев оптической системы радиометра излучением объекта при измерении высоких температур с небольших расстояний, значительные изменения температуры окружающей среды;
- особенности теплового излучения объектов, нагретых до высоких температур (выше 500°C);
- зависимость излучательной способности объекта от его состояния и угла наблюдения.

Итак, вышеперечисленные особенности, наряду с требованиями высокого пространственного разрешения (угол визирования не хуже 1:50); возможности изменения угла визирования (от 1:10 до 1:100) в зависимости от исследуемого объекта; незначительной относительной погрешностью (не превышающей 2% при времени накопления 1с); широким динамическим диапазоном измеряемых температур (от 20°C до 1200°C) и нелинейной зависимостью яркостной температуры объекта от его физической температуры, обуславливают

необходимость создания микропроцессорной системы измерения ИК излучения, способного работать в сложных внешних условиях.

### **Цель исследования:**

Целью работы является разработка принципов построения радиометров, работающих в широком диапазоне измеряемых мощностей при точечном нагреве материалов.

### **Задачи работы:**

- исследование особенностей оптико-электронного преобразования ИК сигналов модуляционным пироэлектрическим приемником в широком диапазоне мощностей падающего излучения;
- оценка потенциальных свойств пироэлектрического приемника в составе радиометра;
- исследование возможности управления динамическим диапазоном измеряемых температур изменением частоты модуляции;
- разработка экспериментальной установки и методики высокотемпературной радиометрии.

### **Методы исследования:**

Методы статистической радиофизики, теория погрешностей, методы радиофизических измерений, принципы построения микропроцессорных систем и программного обеспечения, методы теории сигналов и цепей.

### **Научная новизна:**

- запатентован двухканальный ИК радиометр и разработана конструкция диафрагмированной оптической системы для исключения влияния нагрева оптической системы на погрешность измерения;
- впервые предложен способ исключения влияния частотной нестабильности опорного колебания на погрешности измерений пироэлектрического радиометра;
- обоснован метод «смещенного измерителя» для высокотемпературной ИК радиометрии при локальном нагреве материалов;
- предложены оригинальные способы исключения влияния флуктуации фазы при модуляции на погрешности при измерениях;
- разработаны и реализованы методы автоматической калибровки и динамического изменения шкалы измеряемых температур.

### **Научная и практическая значимость:**

- запатентованный способ компенсации погрешности, обусловленной нагревом диафрагмированной оптической системы, с помощью компенсационного канала может использоваться при измерении высокотемпературных процессов;
- метод «смещенного измерителя», способ калибровки и пересчеты отклика радиометра в физическую температуру объекта могут использоваться для устранения влияния излучательной способности на результаты измерения;
- для измерения и контроля широкого диапазона температур и при сложных внешних условиях созданы комплект ИК радиометров и автоматизированная система их калибровки и тестирования;

- определены пути уменьшения погрешностей ИК радиометров с механической модуляцией потока излучения.

#### **Вклад автора:**

- обоснованы и экспериментально доказаны способы расширения динамического диапазона ИК радиометра;
- предложен и экспериментально подтвержден способ “смещенного” измерителя;
- предложен, теоретически исследован и обоснован способ компенсации нагрева оптической системы;
- разработан, обоснован и реализован алгоритм обработки модулированного колебания, синхронного детектирования и интегрирования сигнала в цифровом модуляционном ИК радиометре;
- предложен и экспериментально доказан алгоритм исключения влияния неправильной установки фазы опорного колебания;
- предложены и экспериментально проверены алгоритмы устранения погрешностей, связанных с флуктуацией фазы;
- разработан программно-аппаратный комплекс по проведению автоматической калибровки и тестирования ИК радиометров.

#### **Публикации, апробации на конференциях, внедрение**

По результатам работы опубликованы 7 статей в центральных рецензируемых журналах; получены патент РФ на изобретение и свидетельство Роспатента на полезную модель; опубликованы материалы 8 докладов в Трудах научных конференций по радиофизике в ННГУ.

Результаты исследований доложены на международной конференции «XVI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 25-27 мая 2000г. г. Москва, Россия», на 7-ой Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ 2006, Владимир, 28-31 августа 2006 г. – 2006», на конференциях по радиофизике в ННГУ (1998 г., 1999 г., 2000 г., 2002 г., 2003 г., 2004 г.).

Участие в международной выставке “Дни Нижегородской области в Чехии” 1999г., во Всероссийской выставке “Россия на рубеже веков” 1999г., во Всероссийской выставке “Воспитание, образование, карьера” 2000 г., во Всероссийском научно-промышленном форуме, 2003г..

Результаты работы внедрены в научно-исследовательском конструкторском институте энерготехники им. Долежала Н.А. г. Москва, в Вятском госуниверситете и Нижегородском госуниверситете им. Н.И.Лобачевского.

#### **На защиту выносятся:**

- двухканальный ИК радиометр с диафрагмированной оптикой, обеспечивающей защиту от внешних механических воздействий и компенсацию внешних температур;
- метод “смещенного” измерителя для высокотемпературной пирометрии при локальном нагреве материалов;
- способ исключения влияния частотной нестабильности опорного колебания на погрешности измерений пироэлектрического радиометра;

- способы исключения влияния флуктуации фазы модуляции принимаемого излучения на ошибку измерения.

### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений. Диссертация изложена на 163 страницах, в том числе 130 страниц основного текста. Список литературы содержит 129 наименований и приведен на 11 страницах.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** излагаются состояние и актуальность предмета исследования, обоснование методов исследования, цели и структура работы.

**В первой главе** производится обоснование выбора типа температурного датчика, вида оптической системы и радиометрического метода обработки информации для решения задач, которые связаны с исследованием свойств материалов, находящихся в условиях локальных ионно-плазменных воздействий.

В качестве датчика температуры выбран пироприемник, отличающийся постоянством чувствительности от короткого ИК до длинноволнового инфракрасного излучения. Так как детектор действует как емкостной источник напряжения, то он обладает минимальным собственным значением шума и не требует напряжения начального смещения.

Обосновано использование диафрагмированной оптической системы и типа модуляции ИК радиометра.

Предложен перспективный метод компенсации дрейфа температуры оптической системы ИК радиометра, основанный на использовании второго компенсационного оптического канала, который находится в тех же условиях, что и основной канал, но не пропускает излучение объекта. При этом сигнал, полученный с компенсационного канала, необходимо вычитать из сигнала основного канала.

ИК радиометр, разработанный для радиометрии локальных температурных неоднородностей в широком диапазоне температур, функционально состоит из двух блоков: ИК датчика и блока управления и индикации (БУИ) (рис. 1).

ИК датчик предназначен для осуществления пространственной избирательности, оптико-электронного преобразования измеряемого излучения, синхронного накопления сигнала, а также выполнения ряда сервисных функций, таких как поддержка асинхронного обмена с блоком управления и индикации и управление лазерным целеуказателем (рис. 2).

Необходимость получения высокого пространственного разрешения температурного поля требует использование оптической системы, но воздействие паров испаряющегося металла не позволяет использовать оптическую систему в виде зеркал или линз. Была разработана ИК световодная диафрагмированная оптическая система, находящаяся в вакуумной камере и позволяющая получить пространственное разрешение не хуже 5 мм на расстоянии 200 мм от объекта. Секционное выполнение металлических ИК

световодов обеспечило возможность управления углом визирования от 1:10 до 1:100.



Рис. 1 Внешний вид ИК радиометра.

В целях компенсации влияния изменения температуры световода на точность измерения в измерительном датчике предусмотрен компенсационный канал с закрытым приемным окном. Пироприемники каждого из каналов осуществляют преобразование потоков излучения, предварительно промодулированных модулятором, в электрический сигнал. Применение предварительной модуляции теплового потока позволяет использовать синхронное детектирование. Усиленные аналоговые сигналы поступают на ФНЧ каждого из каналов и далее для преобразования в цифровую форму на АЦП. Микроконтроллер выполняет функции по обработке полученных цифровых данных, управлению всеми аппаратными узлами датчика, поддержанию связи с блоком управления по интерфейсу RS-485 и хранению необходимого программного обеспечения и данных. Оптопара, микроэлектродвигатель, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) образуют петлю ПИД-регулирования частоты модуляции. Термометр, усилитель датчика термостата, драйвер термостата, нагреватель и программно реализованный алгоритм ПИД-регулирования образуют петлю регулирования температуры термостата радиометра. Для локализации измеряемой области используется прицел, выполненный на базе лазерного диода.

Блок управления и индикации осуществляет индикацию требуемого параметра и, используя органы управления, дает пользователю возможность управлять режимами работы ИК радиометра.

Программное обеспечение (ПО) модуля ИК датчика как и ПО БУИ с точки зрения архитектуры построено идентично. ПО включает в себя фоновый процесс, состоящий из набора функций аппаратных прерываний контроллера,

работающих в режиме реального времени, и основной процесс, отвечающий за обработку запросов от функциональных программных модулей.

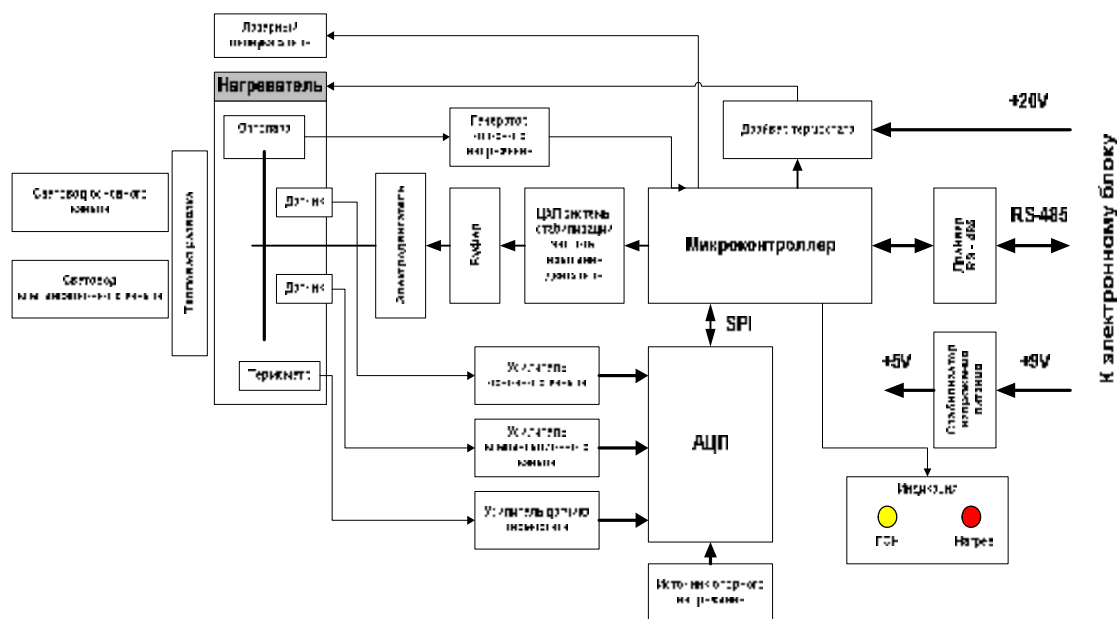


Рис. 2 Структурная схема ИК датчика.

Разработанный ИК радиометр обладает следующими техническими характеристиками:

Диапазон измеряемых температур, град. С	от +20 до +2000
Рабочая длина волны, мкм	2 – 25
Относительная погрешность измерения, %	1.0
Время измерения в одной точке, сек	0.2 – 5
Расстояние до измеряемого объекта, мм	до 200
Угол визирования	1:10 - 1:100
Допустимая окружающая температура электронных блоков, град.С	от –30 до +35
Наличие лазерного целеуказателя	+
Система защиты от паров металла	+
Интерфейсы	ПК(RS232)/ADAM(RS485)
Питание	~220 В

**Во второй главе** рассмотрены проблемы использования бесконтактных методов измерения температуры, предложены способ компенсации негативного влияния нагрева диафрагмированной оптической системы ИК радиометра, метод измерения температуры вне точки нагрева и приведены экспериментальные данные, обосновывающие их применение.

Измерение температуры бесконтактными радиометрами более технологично чем контактное, однако при этом имеет место ряд эффектов, увеличивающих погрешность измерения при высокой температуре объекта. Кроме сложной зависимости коэффициента излучения от температуры, погрешность вносят особенности теплового излучения испаряющегося металла. К мешающим факторам можно отнести большой градиент температуры в



области нагрева, что приводит к необходимости узкого «поля зрения» радиометра в плоскости объекта. С целью уменьшения влияния отмеченных мешающих факторов предлагается производить бесконтактное измерение температуры не в точке нагрева, а на некотором расстоянии  $r$  от нее, а затем полученный результат пересчитывать в истинную температуру нагрева.

При этом можно избежать проблем, связанных с неоднозначной зависимостью температуры от яркости, т.к. в точке измерения коэффициент излучения достаточно стабилен вследствие относительно невысокой температуры.

Данный способ измерения («смещенный измеритель») схематично показан на рис. 3. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – блок управления и индикации; 2 – ИК датчик; 3 – электронный пучок; 4 – необходимый для предварительной калибровки контактный (термопарный) термометр; 5 – термопара, зачеканенная в поверхность объекта (необходима только для калибровки).

Дополнительное преимущество метода смещенного измерителя заключается в защите стекла ИК-ввода от напыления при электронно-лучевой обработке металла в вакууме. Основное назначение диафрагмированной системы – затенение оптического излучения, приходящего не из области визирования.

На экспериментальной установке было проведено исследование радиометрического контроля температуры в широком диапазоне температур при локальном электронно-лучевом воздействии на циркониевые материалы.

На рис. 4 приведена зависимость напряжения  $U_{пир}$  на выходе пироэлектрического ИК радиометра от физической температуры  $T$ , измеренной контактным способом с помощью вольфрам-редиевой термопары.

Отметим, далее, что на сравнительно низких температурах ( $T < 600^\circ\text{C}$ ) показания пироэлектрического ИК радиометра  $U_{пир}$  при  $3 < l < 30$  мм слабо зависят от расстояния  $l$  до места

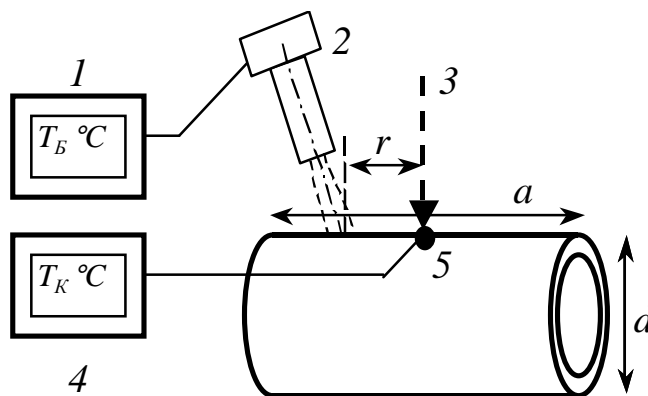


Рис. 3 Схема установки для бесконтактного измерения температуры.

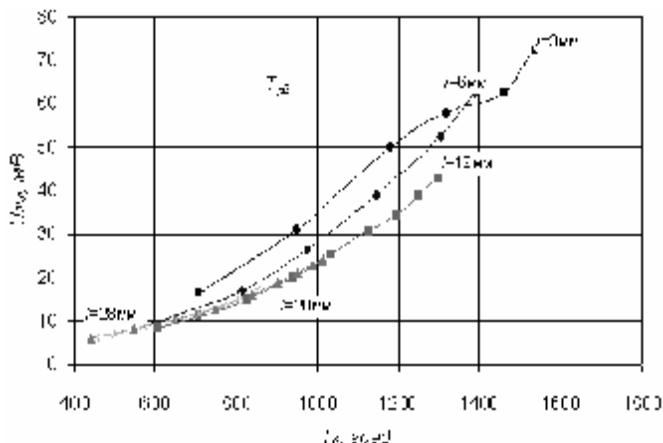


Рис. 4 Зависимость напряжения  $U_{пир}$  на выходе пироэлектрического ИК радиометра от физической температуры  $T$ .

нагрева. Учитывая хорошее подавление пироприемником ПМ-4 видимого излучения, можно предположить, что зависимость характеристик  $U_{nup}=f(T)$  при высоких температурах от расстояния до места нагрева ( $l < 12\text{мм}$ ) обусловлено в основном двумя факторами: большим градиентом температур вблизи точки нагрева и дифракционным вкладом диафрагмированной оптики, проявляющимся вне основной зоны диаграммы направленности.

В результате дифракции на передней диафрагме диафрагмированной оптической системы в приемник попадает также излучение точек объекта, расположенных за пределами геометрооптического поля зрения. Это дополнительное воздействие изменяет отклик приемника, причем вносимая погрешность определяется распределением температуры объекта по всей его поверхности.

При малых расстояниях  $l$  между точкой нагрева и точкой измерения температуры погрешность  $dB$  имеет отрицательный знак и возрастает с уменьшением расстояния (по абсолютной величине) до значений  $1.5 \div 2\%$ . Так как с уменьшением расстояния  $l$  через дифракционные боковые лепестки принимается излучение от областей объекта, гораздо более «холодных», чем объект в геометрооптическом поле зрения.

При больших расстояниях  $l$  между точкой нагрева и точкой измерения температуры погрешность  $dB$  стремится к нулю, т.к. с удалением от точки нагрева разница яркости поля зрения и фона уменьшается (вследствие уменьшения модуля градиента температуры).

Таким образом, учитывая эти особенности точечного нагрева, сложную зависимость излучательной способности  $\epsilon$  от температуры, а также неидеальность направленных свойств оптики, целесообразно смещать точку измерения температуры радиометром на расстояние  $Dl^3R$ , где  $R$  – радиус поля зрения радиометра в плоскости объекта с учетом дифракционного вклада. Для используемого пироэлектрического радиометра зависимость отклика от температуры приобретает монотонный и предсказуемый вид при  $R \approx 6\text{мм}$  (что совпадает с радиусом поля зрения, полученном при оптическом тестировании диафрагмированной оптики радиометра).

Учитывая, как указывалось выше, что бесконтактное измерение высоких поверхностных температур  $T$  целесообразно проводить в стороне от места нагрева, необходимо определить характер изменения температуры в зависимости от расстояния  $l$  до точки измерения и оценить погрешность, возникающую в результате ошибки позиционирования при измерениях.

На рис. 5 показаны экспериментально полученные при помощи вольфрам-редиевой термопары зависимости контактной температуры  $T$  от расстояния между местоположением термопары и точкой нагрева  $l$  при разных токах нагрева  $I$ .

Как видно из рис. 5, при увеличении расстояния от места нагрева скорость увеличения температуры с ростом тока пучка уменьшается. Так, при изменении тока электронного пучка от 10 мА до 35 мА, на расстоянии в 6 мм контактная

температура  $T$  меняется от 600 до 1100°C, на расстоянии в 28 мм – от 430 до 750°C.

Исследованы, реализованы и экспериментально проверены два способа расширения динамического диапазона ИК радиометра, первый из которых связан с изменением размера входного отверстия диафрагмированной оптики, что способствует соответствующему изменению потока энергии и, тем самым, управлению динамическим диапазоном ИК радиометра. При втором подходе расширение динамического диапазона возможно путем специфического свойства пьезоэлектрического кристалла - зависимость перепада напряжений на кристалле от частоты модулирующего напряжения. Дело в том, что пьезоэлектрик является емкостным датчиком и, следовательно, его импеданс уменьшается по закону  $1/\Omega$  м. В соответствии с таким законом уменьшается и напряжение на кристалле, обусловленное поглощенной ИК мощностью (рис. 6).

Предложено управление величиной частоты модуляции (в зависимости от диапазона измеряемых температур), что позволит увеличить чувствительность при измерении слабых ИК излучений и загрузить ее при измерении сильных ИК излучений. Таким образом, можно изменять динамический диапазон радиометра, подбирая чувствительность прибора под конкретные условия измерения.

Разработанная система автоматической калибровки и тестирования ИК радиометра позволяет производить калибровку ИК радиометра как в автоматическом, так и в ручном режимах с высокой точностью, осуществлять настройку аппаратной части приборов, производить измерение температуры в реальном времени с выводом данных в графическом виде на экран ПК, обрабатывать их и сохранять в файл.

**В третьей главе** вычисляется потенциальная точность измерений температуры и производится оценка реальной чувствительности

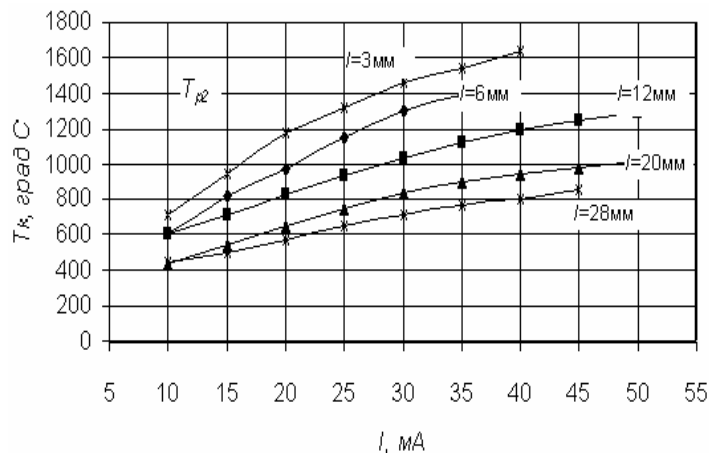


Рис. 6 Зависимость контактной температуры от тока электронного пучка для разных расстояний от места нагрева.

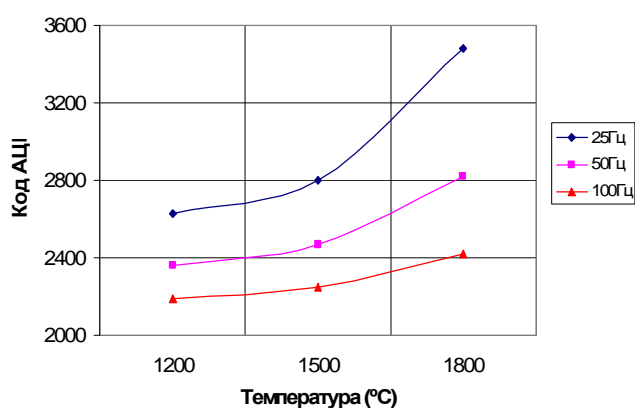


Рис. 5 Зависимость показаний радиометра (код АЦП) от температуры образца при разных значениях частоты модуляции.

пирозлектрического приемника. Определяются источники инструментальных погрешностей диафрагмированного пирозлектрического ИК радиометра и обосновываются способы их уменьшения.

Теоретически показано, что потенциальная чувствительность пирозлектрических датчиков очень высока, и используя их можно измерять температуры с точностью  $\Delta T_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-7} K$ . Использование в ППИ усилительного устройства, имеющего собственные шумы, ухудшает реальную чувствительность. Это связано с недостаточно высокой вольт-ваттной чувствительностью  $S_V$  реальных пиродатчиков.

В работе определена погрешность, которую вносит частичная неопределенность температуры стенок оптической системы. На рис. 7

$$\Omega_0 = 2p \int_0^{q_0} \sin q \cos q dq = p \sin^2 q_0, \quad \Omega_s = 2p \int_0^{\frac{p}{2}} \sin q \cos q dq = p \cos^2 q_0 \quad (1)$$

Так как приемник является приемником полного излучения, то мощность теплового излучения, принимаемого от объекта и стенки, соответственно равны:

$$P_0 = Ae\Omega_0 T_0^4, \quad P_s = Ae_s \Omega_s T_s^4, \quad A = const, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения объекта,  $\varepsilon_s$  – коэффициент излучения стенки. При измерениях отклик приемника определяется суммарной принятой энергией, т.е.  $P_0 + P_s$ . Причем различить воздействие этих двух слагаемых нельзя, поскольку и то, и другое одинаково

промодулировано. Если  $T_0$  постоянно, то при изменении температуры стенки  $T_s$  имеем воздействие на приемник  $P_0 + (P_s + DP_s)$ , что ошибочно интерпретируется радиометром как

$(P_0 + DP_0) + P_s$ , где  $DP_0 = DP_s$ . Абсолютное изменение измеренного значения  $T_{0И}$  температуры объекта равно (при условии  $T_0 = const$ )

$$\Delta T_{0И} = \Delta T_s \frac{\Delta T_0}{\Delta T_s} = \Delta T_s \frac{\Delta T_0}{\Delta T_s} \frac{\Delta P_s}{\Delta P_0} \rightarrow \frac{dP_s}{dP_0} \frac{\Delta T_s}{\Delta T_0} \quad (3)$$

Соответственно, относительная погрешность  $dT_{0И}$ , обусловленная дрейфом  $T_s$  (рис. 8), с учетом (3) равна:

$$dT_{0И} = \frac{\Delta T_{0И}}{T_0} = \frac{dP_s}{dP_0} \frac{\Delta T_s}{T_0} = \frac{4Ae_s \Omega_s T_s^3}{4Ae\Omega_0 T_0^3} \frac{\Delta T_s}{T_0} = \cot^2 q_0 \frac{e_s T_s^3 \Delta T_s}{e T_0^4} \quad (4)$$

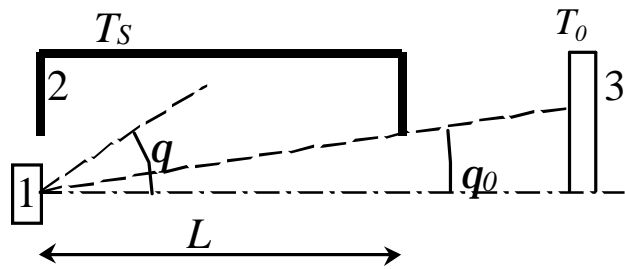


Рис. 7 Рассмотрение влияния температуры оптической системы на отклик приемника .

Из (4) видно, что погрешность близка к нулю без какой-либо компенсации в следующих случаях:

1.  $q_0 \rightarrow \pi/2$ . Диафрагмированной оптической системы нет, объект занимает все полупространство перед приемником.

2.  $e_S \rightarrow 0$ . Коэффициент отражения внутренней поверхности оптической системы равен 1.

3.  $T_S \rightarrow 0$ . Оптическая система охлаждена до абсолютного нуля.

4.  $DT_S \rightarrow 0$ . Оптическая система термостатирована.

5.  $eT_0^4 \gg (\cot^2 q_0 e_S T_S^3 DT_S)$ . Температура объекта достаточно велика.

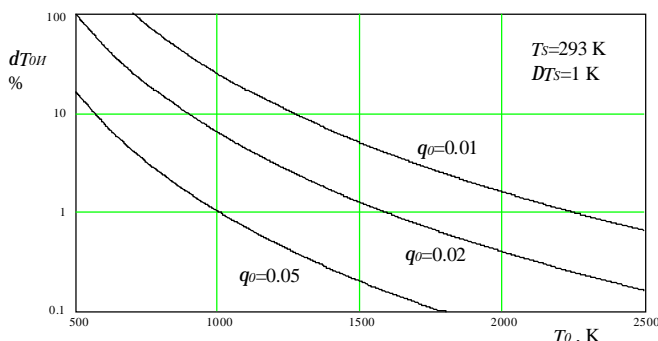


Рис. 8 Зависимость погрешности измерения  $dT_{0ИИ}$  от температуры объекта при различных углах визирования.

Случаи 1 и 2 неприемлемы для дистанционных измерений, 3 и 4 – обладают высокой сложностью реализации, 5 – имеет место только при определенных условиях.

Для компенсации нагрева передней стенки оптической системы необходимо обеспечить равные площади отверстий в передних стенках основного и компенсационного каналов, что должно выровнять мощности, поглощаемые как передними, так и боковыми стенками каналов. С этой целью предложено в каждой диафрагме компенсационного канала выполнить несколько «компенсационных» отверстий, суммарная площадь которых равна площади отверстия в соответствующей диафрагме основного канала. При этом компенсационные отверстия расположены так, что через них излучение объекта не попадает в приемник (рис. 9). Наличие компенсационных отверстий приводит к тому, что в обоих каналах часть излучения проходит через отверстия и поглощается внутренней поверхностью оптической системы, что делает компенсацию более точной. Определено уменьшение погрешности измерений вследствие использования предложенной конструкции каналов.

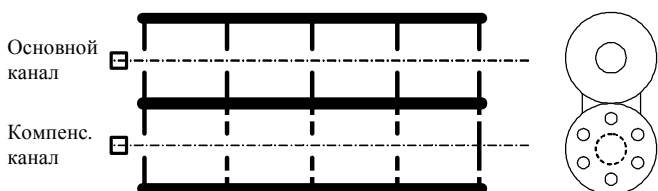


Рис. 9 Оптическая система с компенсацией.

Использование модуляционного способа измерения температуры требует проведения оценки погрешностей, связанных с нестабильностью вращения обтюратора: флуктуацией фазы модулирующего колебания, «уходами» частоты модулирующего воздействия. Нестабильность скорости вращения обтюратора проявляется как в виде медленных уходов частоты с характерным временем  $\tau > 1$  сек., так и кратковременных отклонений мгновенной частоты от среднего значения. Соответствующие нестабильности приводят к появлению как

систематической ошибки, искажающей среднее значение измеренной температуры, так и случайной ошибки, увеличивающей дисперсию.

Анализ показывает, что медленные уходы частоты при частотах модуляции  $F = 10 \div 20 \text{ Гц}$  дают ошибку в единицы процентов, уменьшающуюся при увеличении постоянной времени  $t_0$ . Однако при определенном соотношении между частотой модуляции  $F$  и постоянной времени  $t_0$  систематическая ошибка может быть устранена. Под кратковременной частотной нестабильностью будем понимать случайные флуктуации частоты вращения механического модулятора, приводящие к временному рассогласованию сигнала и опорных импульсов, подаваемых на синхронный детектор (рис. 10). Характерное время таких флуктуаций существенно меньше времени усреднения  $\tau \approx 1 \text{ сек.}$

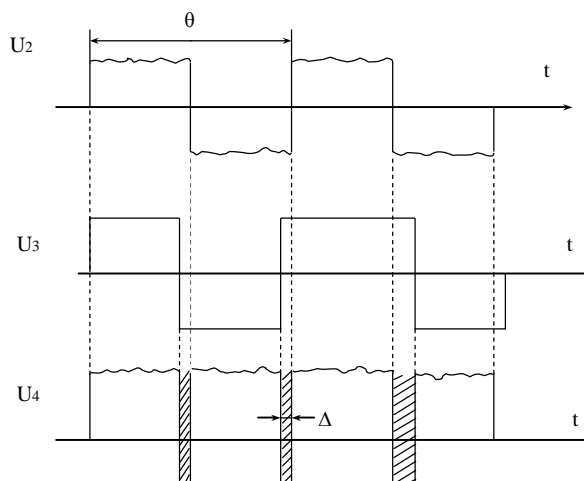


Рис. 10 Механизм возникновения случайной ошибки .

Флуктуационная ошибка, вызванная кратковременной нестабильностью скоростью вращения модулятора, зависит как от относительной нестабильности  $\sigma/\Theta$ , так и от величины разности  $T_1 - T_0$ . Это обстоятельство при большой величине разности  $T_1 - T_0$  предъявляет весьма жесткие требования к стабильности скорости вращения модулятора.

Было показано, что наличие частотной зависимости выходного напряжения пирозлектрического датчика приводит к появлению систематической ошибки в случае отклонения частоты модуляции от номинального значения. Величина этой ошибки может быть как положительной, так и отрицательной, в зависимости от параметров и схемы включения датчика.

Предложено скомпенсировать эту погрешность с помощью корректирующих цепей. Вычисляя коэффициент частотной чувствительности пиродатчика и корректирующей цепи, находим, что относительная зависимость всей цепи будет иметь вид:

$$y_d = \frac{1}{|k_1|} \frac{d|k_1|}{dw} = \frac{1}{w} - \frac{2w^2 t^3}{1 + (wt)^2}, \quad (5)$$

$$y_0 = \frac{1}{|k_0|} \frac{d|k_0|}{dw} = \frac{2wt_0}{1 + (wt_0)^2}, \quad (6)$$

где:

$k_1(w)$  - частотный коэффициент передачи пиродатчика,

$k_0(w)$  - частотный коэффициент передачи корректирующей цепи,

$t(w)$  - постоянная времени пиродатчика,

$t_0(w)$  - постоянная времени корректирующей цепи.

Требуемая частотная компенсация будет обеспечена если  $\psi = 0$ , то есть:

$$y_d + y_0 = 0. \quad (7)$$

Следовательно, исходя из условия (7) постоянная времени компенсирующей цепи будет равна:

$$t_0 = \sqrt{\frac{y_d}{2w - y_d w^2}}. \quad (8)$$

Как было отмечено выше, нестабильность частоты модуляции и флуктуации фазы могут привести к погрешностям измерения температуры в единицы процентов.

Для уменьшения погрешности, связанной с установкой и нестабильностью частоты модуляции, предложено использовать автоматическую систему управления скоростью вращения электродвигателя (рис. 11).

Для управления частотой модуляции используется система автоматического регулирования, построенная на базе ПИД-регулятора. Использование этого метода стабилизации частоты приводит к значительному уменьшению вклада погрешностей, связанных с нестабильностью частоты модуляции, в измеряемое значение температуры.

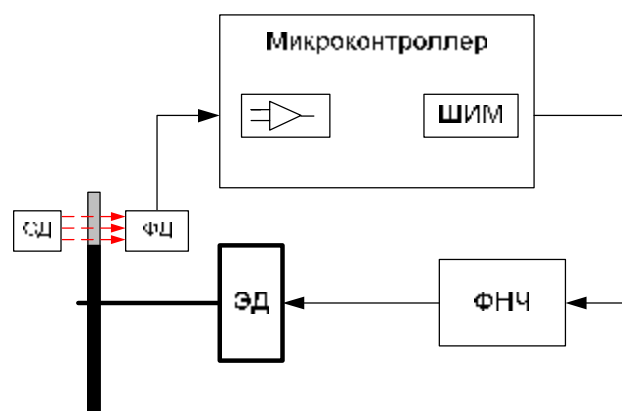


Рис. 11 Схема автоматического регулирования частоты модуляции .

Предложено устранение ошибки, связанной с неправильной установкой фазы опорного колебания и ее флуктуациями, путем микропроцессорной обработки. Программная реализация позволяет производить необходимую временную задержку между фронтом импульса модулирующего колебания и моментом старта синхронного детектирования сигнала.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

Получены статистические характеристики выходного сигнала модуляционного радиометра при флуктуациях длительности полупериодов модуляции. Показано, что при нецентрированном прямоугольном сигнале для минимизации дисперсии отклика модуляционного радиометра следует обеспечивать максимальное время корреляции длительности полупериодов модуляции, т.е. желательно применять механический модулятор с большим моментом инерции.

Показано, что в одноканальном ИК радиометре, при расположении модулятора между оптической системой и приемником, дрейф температуры оптической системы, обусловленный внешними воздействиями, приводит к значительной погрешности измерения. Использование компенсационного канала позволяет значительно уменьшить указанную погрешность.

Для уменьшения погрешности, имеющей место в результате нагрева оптической системы излучением объекта измерения, предложено использование специальных отверстий в компенсационном канале диафрагмированной оптики.

Доказано, что измерение температуры вне точки локального нагрева с последующим определением температуры точки нагрева (по соответствующей калибровочной характеристике) позволяет уменьшить погрешность, обусловленную сильным изменением коэффициента излучения материала и ИК излучением паров металла.

Для калибровки пирометра и проведения измерений целесообразно смещение точки нагрева на ширину геометрооптической диаграммы направленности. Такой подход позволяет получить методическую погрешность не более 3 – 5% (в зависимости от позиционирования пирометра), уменьшить влияние изменения коэффициента излучения материала при температурах плавления, а также сделать менее строгими требования к динамическому диапазону пирометра.

Минимизация погрешности соответствия радиационной температуры  $T_{II}$  и физической температуры  $T_0$  достигается при позиционировании пирометра в точку измерения, совпадающую с точкой калибровки.

Обоснована возможность уменьшения погрешности измерения температуры за счет использования микропроцессорной обработки сигналов. Предложен и реализован способ стабилизации частоты модуляции, построенный на базе программно реализованного ПИД-регулятора.

Предложены и реализованы программные алгоритмы полной компенсации погрешности, связанной с флуктуацией фазы опорного колебания, а также алгоритм компенсации ошибки синхронного детектирования, вызванной динамическими свойствами пиродатчика и аналогового тракта ИК радиометра.

Построение ИК радиометра, состоящего из двух функционально законченных модулей, позволило решить вопросы, связанные с установкой прибора на объект измерения, обеспечило распределенную функциональность ИК радиометра, использование системных ресурсов и процессорного времени, подключение к ПК и в информационную сеть хост-контроллера.

Построение ИК радиометра на базе микроконтроллера позволило существенно улучшить метрологические свойства прибора, расширить его функциональность.

Использование разработанного источника эталонного излучения и системы автоматической калибровки и тестирования ИК радиометров позволяет производить калибровку ИК радиометра как в автоматическом, так и в ручном режимах, осуществлять настройку аппаратной части приборов, производить измерение и анализ температуры в режиме реального времени.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Афанасьев, А.В. Многоканальная ИК-система сбора и передачи информации / В.А. Односецев, И.Я. Орлов // Прикладная физика.- 2000.- № 6.- С.29-37.
2. Афанасьев, А.В. Инфракрасный пирометр для контроля температуры в вакуумных установках / В.С. Лебедев, И.Я. Орлов, А.Е. Хрулев // Приборы и техника эксперимента.- 2001.- №2.- С.155-158.
3. Патент на полезную модель. Пирометр / А.Н.Семенов, В.Н.Тюрин, И.Я.Орлов, А.В.Афанасьев. - № 25938; Опубликовано 27.10.02.
4. Афанасьев, А.В. Инфракрасный микропроцессорный пирометр с диафрагмальной оптикой / И.Я. Орлов // Приборы и техника эксперимента.- 2003.- № 1.- С.149-152.
5. Афанасьев, А.В. Инфракрасный микропроцессорный пирометр с комбинированной оптической системой / И.Я. Орлов // Датчики и системы.- 2003.- № 2.- С.41-45.
6. Патент РФ. Пирометр. / А.Н.Семенов, В.Н.Тюрин, И.Я.Орлов, А.В.Афанасьев. - № 2215269; Заявлено 06.05.02; Опубликовано 27.10.03.
7. Афанасьев, А.В. ИК радиометрия высокотемпературных процессов при точечном нагреве материалов / И.Я. Орлов, А.Е. Хрулев // Известия ВУЗов. Радиофизика.- 2004.- т. XLVII.- №8.- С.668-674.
8. Афанасьев, А.В. Система контактной термодиагностики буксовых узлов подвижного состава / А.П. Евсеев, А.В. Односецев, И.Я. Орлов // Датчики и системы.- 2004.- №6.- С.35-37.
9. Афанасьев, А.В. Контроль методами ИК и СВЧ радиометрии процессов установления термодинамического равновесия в биологических тканях / О.А. Афанасьева, П.И. Орлов, И.Ю. Мазунин // Вестник ННГУ, серия Радиофизика.- 2005.- Вып 1(3).- С.40-49.
10. Афанасьев, А.В. ИК и СВЧ – радиометрия процесса теплопередачи в биологических тканях / О.А. Афанасьева, П.И.Орлов, И.Ю. Мазунин // 7-я Международная научно-техническая конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ 2006», Владимир, 28-31 августа 2006 г. – 2006. – Сборник докладов. - Книга 1. – С. 48-50.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ГЛАВА I. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ИК РАДИОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ	23
1.1 Влияние условий измерения на оптико-электронную систему радиометра	23
1.2 Структура микропроцессорного ИК радиометра	34
1.3 Технические характеристики	43
1.4 Выводы	44

2	ГЛАВА II. ИК РАДИОМЕТРИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТОЧЕЧНОМ НАГРЕВЕ МАТЕРИАЛОВ	46
2.1	Излучательная способность материалов при нагреве	46
2.2	Метод “смещенного” измерителя	48
2.3	Экспериментальная ИК радиометрия при точечном нагреве материалов в условиях вакуума	55
2.4	О некоторых возможностях расширения динамического диапазона ИК радиометра	62
2.5	Автоматизированная калибровка ИК радиометра	65
2.6	Выводы	78
3	ГЛАВА III. ИСТОЧНИКИ АППАРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДИАФРАГМИРОВАННОГО ИК РАДИОМЕТРА	81
3.1	Оценка реальной чувствительности пироэлектрического преобразователя в модуляционном радиометре	81
3.2	Инструментальные погрешности диафрагмированного модуляционного ИК радиометра	96
3.2.1	Погрешности, обусловленные нагревом оптической системы излучением объекта измерения.	96
3.2.2	Погрешности, обусловленные неравномерностью скорости вращения обтюратора	106
3.3	Выводы	130
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132
	ПРИЛОЖЕНИЕ I	136
	Экспериментальная установка для термической обработки металлов электронным пучком	136
	ПРИЛОЖЕНИЕ II	139
	Комплект ИК радиометров для измерения локальных температурных неоднородностей в широком диапазоне излучаемых мощностей.	139
	ПРИЛОЖЕНИЕ III	142
	Программное обеспечение: алгоритмы работы.	142
	ЛИТЕРАТУРА	153