

## Видеотелеметрический контроль промышленных изделий

Д. И. Климов, [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассматриваются принципы построения системы бесконтактного измерения физических величин и параметров, характеризующих воздействия внешних факторов на промышленные изделия. Введены понятия и определения, касающиеся удаленного бесконтактного измерения параметров. Предложен вариант системы с блоком измерения температуры, описан способ измерения температуры бесконтактным методом посредством видеокамер, основанный на пирометрических методах и теории теплового излучения с учетом интегрального коэффициента теплового излучения серого тела. Приведены температурные зависимости интегрального коэффициента теплового излучения для некоторых металлов. После обработки видеоинформации спектральным методом осуществляется вычисление интегрального значения температуры в рассматриваемых контролируемых зонах по цветовому спектру или яркости. Приведен анализ существующих алгоритмов сжатия видеоинформации. Сформулированы требования к применению и принципы построения системы с блоком измерения температуры в широком диапазоне, а также ее отличительные особенности.

**Ключевые слова:** видеотелеметрия, термо-видеотелеметрия, телеметрия, энергонагруженные области, температура, внешние воздействующие факторы, измерение, видеоизображение

## Video Telemetric Control of Industrial Products

D. I. Klimov, [contact@spacecorp.ru](mailto:contact@spacecorp.ru)

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The principles of creation of a system of contactless measurement of the physical quantities and parameters characterizing impacts of external factors on industrial products are considered. Introduced are the concepts and definitions concerning remote contactless measurement of parameters. The article describes a variant of the system with a temperature measurement unit is suggested, the a contactless method of temperature measurement by means of video cameras based on pyrometric methods and the theory of thermal radiation taking into account the integrated coefficient of thermal radiation of a gray body. The temperature dependences of integrated coefficient of thermal radiation for some metals are given. After processing of the video information by the spectral method, the calculation of integrated value of temperature in the controlled zones under examination by a color range or brightness is carried out. Provided is the analysis of the existing algorithms of compression of a video information. Requirements to application and the principles of creation of system with the block of measurement of temperature in the wide range and also its distinctive features are formulated.

**Keywords:** video telemetry, thermo-video telemetry, telemetry, power loaded areas, temperature, external influencing factors, measurement, video image

## Определения и понятия

**Телеметрия (телеизмерение)** — совокупность технологий, позволяющая производить удаленные измерения и сбор информации для ее предоставления оператору или пользователю, составная часть телемеханики. Термин образован от греческих корней «теле» — «удаленный» и «метрон» — «измерение». Хотя сам термин в большинстве случаев относится к способам беспроводной передачи информации (например, посредством радио- или инфракрасного излучения), он также характеризует процесс передачи данных с помощью и других средств массовой коммуникации, таких как телефонные или компьютерные сети, оптоволокно или другие проводные связи [1].

Для сбора данных обычно используют либо датчики телеметрии со специальным встроенным модулем связи, либо устройством связи с объектом (телеметрической системой), к которым подключаются обычные датчики. Однако в промышленных изделиях существуют области или объекты, средняя температура которых в рабочем режиме превышает 1200–1500 К, а также наличествуют области с повышенной радиацией, влажностью и механическими нагрузками, которые получили название энергонагруженных областей.

**Энергонагруженные области** в промышленных изделиях — это области, определяемые на основе априорной оценки, с повышенной вероятностью возникновения разрушения (неисправности составных частей изделия) под действием теплового и/или радиационного излучения.

Для таких областей контактный метод измерения температуры посредством температурных датчиков неприменим ввиду значительного выделения теплового и радиационного излучения, а также воздействия механических перегрузок (большого выделения энергии в замкнутом пространстве в целом). Обозначенные энергонагруженные области объектов наиболее предрасположены к возникновению нештатных и аварийных ситуаций.

По этой причине предлагается осуществлять измерение воздействия внешних факторов на промышленное изделие удаленным бесконтактным методом с помощью видеокамер — видеотелеметрией.

**Видеотелеметрия** — это измерение значений параметров (в том числе уровней воздействия внеш-

них факторов на промышленное изделие), выполненное удаленным бесконтактным методом посредством видеокамер, которое заключается в преобразовании видеоизображения в измерительные сигналы с последующим отображением информации о значениях исследуемых параметров.

## Принципы построения видеотелеметрических систем

Рассмотрим функциональную схему видеотелеметрической системы. Измерение телеметрируемых параметров осуществляется посредством обработки видеоизображения объекта и измерения физических величин, характеризующих воздействия внешних факторов на промышленное изделие. На рис. 1 приведена обобщенная функциональная схема системы видеотелеметрии, включающая аппаратуру измерения и аппаратуру отображения информации.

От видеокамер видеоизображение в форме электрических сигналов или цифрового потока (видеопотока) поступает на блок обработки видеоинформации, в котором осуществляется вычисление телеметрируемых параметров (только вариант (а)), дальнейшая обработка, сжатие видеоинформации и подготовка для передачи целевой информации (в данном случае видеопотока) по радиоканалу. По каналу связи сигнал передается на приемную станцию, а далее на аппаратуру отображения видеоинформации, где также осуществляется вычисление физических величин, характеризующих факторы, воздействующие на промышленное изделие (только вариант (б)).

В блоке приема видеоинформации осуществляется демодуляция и обработка полученного информационного потока. Обработанная видеоинформация поступает на блок вычисления и отображения параметров с частотой опроса примерно 1–3 кад/с.

Предлагается построение системы видеоконтроля, как показано на рис. 1. Функции каждой из составных частей представлены в табл. 1.

## Видеотелеметрическая система для измерения температуры

Основным внешним воздействующим фактором, влияющим на параметры конструкционных



Рис. 1. Обобщенная функциональная схема системы видеотелеметрии

материалов, является **температура** — скалярная физическая величина, примерно характеризующаяся на одну степень свободы средней кинетической энергии частиц макроскопической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия [2].

**Термо-видеотелеметрия** — это способ измерения температуры промышленных изделий при помощи видеокамер с последующей обработкой информации.

Суть этого способа состоит в получении информации о температуре и ее распределении по поверхности объекта наблюдения посредством видеокамер, в которых при помощи фоторегистрирующих приборов видеоизображение преобразуют в цифровой сигнал [3]. После обработки видеoinформации (в диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового излучения) пирометрическим методом осуществляется вычисление интегрального значения температуры<sup>1</sup> в рассматриваемых контро-

лируемых зонах по цветовому спектру [4] или яркости<sup>2</sup> способом, основанным на законе Планка

данного тела в широком диапазоне длин волн по всему спектру от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$  определяемую по закону Стефана-Больцмана [8]:

$$R_0(T) = \sigma_0 T^4, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_0 = 5,6696 \times 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$  — заданная постоянная».

Так как физический закон, определяемый уравнением (1.1), относится к измерению температуры абсолютно черного тела, то измеренная энергия для реального серого тела определяется уравнением (1.1) с точностью до величины  $\varepsilon$ , получившей название **интегральный (или полный) коэффициент теплового излучения**:

$$\varepsilon = \frac{R_0(T)}{\sigma_0 T_{\text{ист}}^4}. \quad (1.2)$$

Эта величина представляет собой отношение энергии излучения, испускаемого материалом при температуре  $T$ , к энергии излучения, испускаемого черным телом при той же температуре. Откуда следует, что

$$T_{\text{ист}} = T / \sqrt[4]{\varepsilon}. \quad (1.3)$$

<sup>2</sup>Согласно [4, 5], «**яркостная температура  $T_n$  тела** — это температура абсолютно черного тела, при которой его спектральная плотность энергетической светимости  $f(\lambda, T)$ , для какой-либо определенной длины волны, равна спектральной плотности, энергетической светимости  $r(\lambda, T)$  данного тела для той же длины волны».

<sup>1</sup>При расчете температурных параметров требуется учитывать полную мощность излучения черного тела при температуре  $T$  (согласно [8], «**радиационную температуру  $T_p$  тела** — температуру абсолютно черного тела, при которой его энергетическая светимость  $R$  равна энергетической светимости  $R_m$

Таблица 1. Функциональное назначение составных частей системы видеотелеметрии

Наименование составной части	Выполняемые функции
Блок видеокамер	– видеосъемка объекта наблюдения, – преобразование видеоизображения в электрический сигнал, – преобразование видеосигнала в цифровой поток*, – сжатие потока видеoinформации*, – передача видеопотока по унифицированному интерфейсу*.
Блок обработки видеoinформации	– прием видеопотока по унифицированному интерфейсу**, – временное хранение видеопотока, – вычисление физических величин программным способом по разработанным методикам в соответствии с результатами калибровочных работ***, – применение помехоустойчивого кодирования к информационному потоку (шифрация), – сбор телеметрической информации о функциональном состоянии (работоспособности составных частей системы), – подготовка для передачи целевой информации по радиоканалу.
Блок передачи видеoinформации	– модуляция потока целевой информации, – усиление промодулированного информационного потока, – перенос информационного потока в требуемый диапазон частот, – передача информации по высокочастотному тракту на антенно-фидерное устройство.
Блок приема видеoinформации	– прием целевой информации по радиоканалу, – демодуляция информационного потока.
Блок вычисления и отображения параметров	– дешифрация целевой информации, – получение исходных данных (видеоизображения или информации о физических величинах)****, – численное представление измеряемых параметров в требуемых размерностях (например, системы СИ), – визуальное или графическое отображение измеряемых параметров.
* — допускается реализация и в блоке обработке видеoinформации, ** — в случае оцифровки видеосигнала в блоке видеокамер, *** — допускается реализация в блоке вычисления и отображения параметров, **** — операция, обратная подготовке, для передачи целевой информации по радиоканалу	

и принципах спектральной и яркостной пирометрии [5–7].

Построим в соответствии с (6.10) с учетом (6.11) графики  $\varepsilon(T)$  для наиболее распространенных типов металлов (рис. 2), перед этим сведя коэффициенты  $\alpha$  и  $\rho_0$  в табл. 2 [5].

Таким образом, условием адекватного измерения температур поверхности с использованием пирометров является правильно выбранный диапазон измерения температур и спектральный диапазон, в котором возможно измерение температуры данного типа объектов. Излучательная способность всех без исключения материалов в соответствии с (6.10) зависит от температуры, при этом, учитывая (1.3), она может меняться для одного и того же материала в различных областях спектра [9].

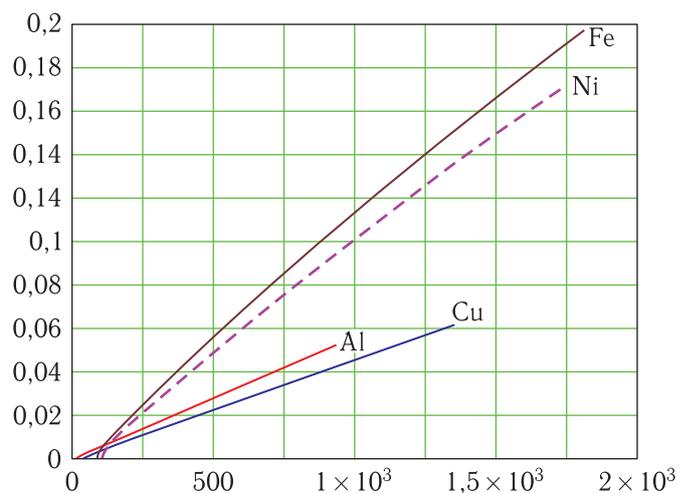
Рис. 2. Графики  $\varepsilon(T)$  для различных типов металлов

Таблица 2. Тепловые характеристики некоторых металлов

Металл	Удельное сопротивление металла при температуре 20 °С ( $\rho_0$ , Ом × см)	Коэффициент теплового изменения удельного сопротивления ( $\alpha$ )	Температура плавления, К
Алюминий	$2,82 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-3}$	933
Медь	$1,72 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-3}$	1356
Железо	$9,80 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-3}$	1808
Никель	$7,24 \times 10^{-6}$	$5,4 \times 10^{-3}$	1726

Для определения температуры монохромного тела достаточно измерить интенсивность  $Y(\lambda, T)$ , излучаемую поверхностью тела для двух различных длин волн [5]. Отношение  $Y(\lambda, T)$  для двух длин волн равно отношению зависимостей  $f(\lambda, T)$  для этих волн, вид которых дается отношением:

$$\frac{Y(\lambda_1, T)}{Y(\lambda_2, T)} = \frac{r(\lambda_1, T)}{r(\lambda_2, T)} = \frac{f(\lambda_1, T)}{f(\lambda_2, T)}. \quad (1)$$

Вычисленная по формуле (1) температура называется спектральной (или цветовой). Спектральная температура тела будет соответствовать истинной, если коэффициент температурного изменения удельного сопротивления практически не меняется от длины волны. Согласно [2, 4], «цветовая температура серого тела совпадает с истинной температурой и может быть найдена также из закона смещения Вина».

Наиболее широко применяемые при контроле температур поверхности технических объектов пирометры работают в диапазоне спектральной чувствительности 7–14 (до 18) мкм. При этом пирометры по большей части основаны на принципе измерения полного излучения [10].

Точность определения температуры поверхности измеряемого объекта с помощью пирометров измерения полного излучения зависит от правильности определения характеристики  $\varepsilon$ .

Для контролируемых зон в рассматриваемом случае измерение температуры осуществляется по цветовому спектру<sup>1</sup> [4] или яркости, на основе

<sup>1</sup>Согласно [4] «спектральная плотность энергетической светимости  $r(\lambda, T) = dW/d\lambda$  — количество энергии, излучаемое единицей поверхности тела, в единицу времени в единичном интервале длин волн (вблизи рассматриваемой длины волны  $\lambda$ ). То есть эта величина численно равна отношению энергии  $dW$ , испускаемой с единицы площади в единицу времени в узком интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , к ширине этого

закона Планка и принципах спектральной и яркостной пирометрии.

Для термоконтроля объектов применимы термо-видеотелеметрические системы, основанные на пирометрическом способе<sup>2</sup> измерения температуры,

интервала. Она зависит от температуры тела, длины волны, а также от природы и состояния поверхности излучающего тела. В системе СИ  $r(\lambda, T)$  имеет размерность [Вт/м<sup>3</sup>]. Энергетическая светимость  $R(T)$  связана со спектральной плотностью энергетической светимости  $r(\lambda, T)$  следующим образом:

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda, \quad [\text{Вт/м}^2]. \quad (3.4)$$

Согласно [5], «цветовая температура  $T_c$  тела — это температура абсолютно черного тела, при которой относительные распределения спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела и рассматриваемого тела максимально близки в видимой области спектра».

Цветовая температура представляет собой температуру излучения отдельных химических элементов и отображается на спектрографе в виде отдельных спектральных линий, излучающих на той или иной частоте (длине волны).

Метод спектральной (цветовой) пирометрии основан на планковском распределении в диапазоне длин волн, а именно [3]:

$$Y = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \cdot \varepsilon_\lambda, \quad (3.5)$$

где  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана,  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  Дж × с — постоянная Планка,  $c = 3 \times 10^8$  м/с — скорость света,  $T$  — температура (К),  $\lambda$  — длина волны (м),  $\varepsilon_\lambda$  — интегральный коэффициент теплового излучения.

<sup>2</sup>Спектральный пирометр калибруется по излучению (на той же длине волны) абсолютно черного тела в градусах яркостной температуры  $T_{ij}$ , связанной с термодинамической шкалой соотношением [13]

$$\frac{1}{T_{ист\ ij}} - \frac{1}{T_{ij}} = \frac{\lambda_{ij}}{1,438} \ln \varepsilon_{\lambda_{ij}}, \quad (4.6)$$

где  $T_{ист\ ij}$  — истинное (откалиброванное) среднее значение температуры в контролируемой зоне поля изображения,

$$T_{ист\ ij} = \frac{1,438 T_{ij}}{1,438 + \lambda_{ij} T_{ij} \ln \varepsilon_{\lambda_{ij}}}. \quad (4.7)$$

посредством которых возможен контроль нарушения термозащиты или механических повреждений конструкции.

Применительно к данной работе наибольший интерес представляют нагретые тела с температурой выше 250–300 °С. Значения температур [4, 11], приведенные в табл. 3, требуют особого внимания при отслеживании оператором температуры после обработки видеoinформации, так как в окрестности данных температур происходит разрушение того или иного материала.

Таблица 3. Температуры плавления и деформации некоторых типов металлов

Материал	Температура плавления, К	Температура необратимого изменения кристаллической решетки, К
Алюминий	933	723
Титан	1933 ± 20	1156
Железо	1812	1042
Вольфрам	3695	1473
Сталь (средние значения)	1720–1795	1258
Никель	1726	956

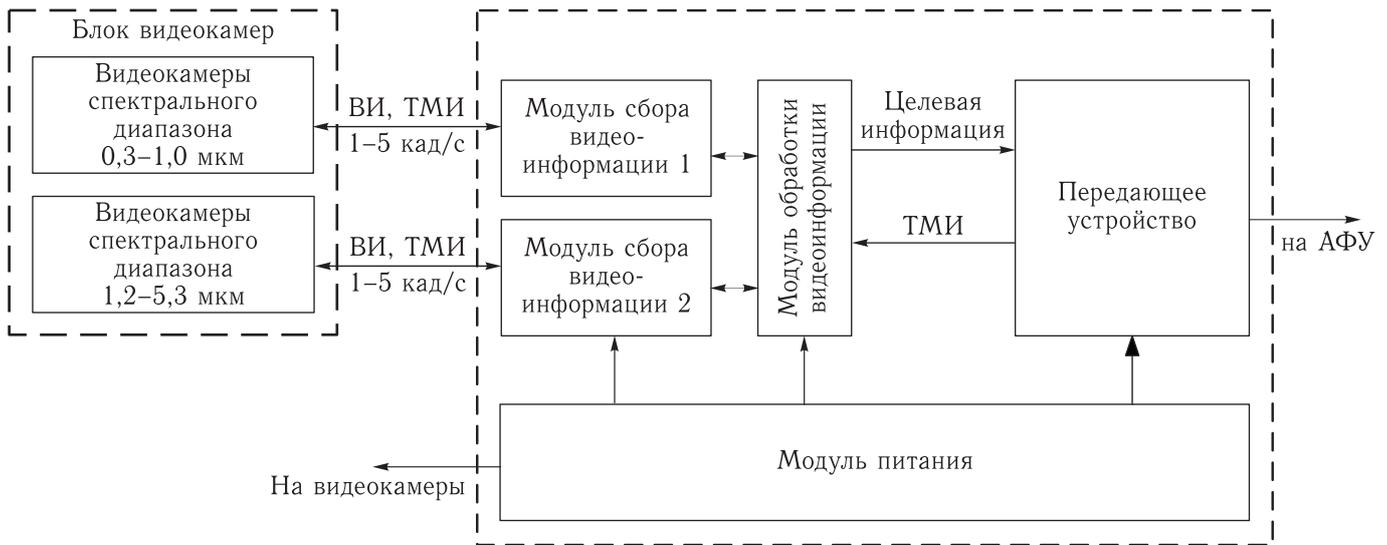
С целью расширения температурного диапазона для отслеживания температуры в выбранной области изображения необходимо установить по две видеокамеры, направленные на одну зону обзора в защитном термокожухе [12]: одна с прибором с зарядовой связью с «виртуальной» фазой, другая — с инфракрасным прибором с зарядовой связью. Обе камеры должны быть настроены на одну и ту же область обзора и пересылать на аппаратуру отображения информации одновременно получаемые потоки информации. Так как имеет место различие разрешений типов фоторегистрирующих приборов, то для обеспечения одинаковой зоны обзора двух видеокамер потребуется установка объективов с разными диаметрами зрачка объектива и разными фокусными расстояниями.

По причине использования широкого спектрального диапазона в устройстве видеокамеры

должны быть предусмотрены специальные объективы и фоторегистрирующие приборы, позволяющие получать информацию в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах. Такими объективами являются «сапфировое окно» (для широкого диапазона 0,2–6,0 мкм), кварцевое стекло (для ближнего ультрафиолетового диапазона, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов 0,2–2,2 мкм), оптический кремний (для ближнего и среднего инфракрасного диапазона 1,2–6,0 мкм), германий (для среднего инфракрасного диапазона 1,2–15,0 мкм) [10]. Что касается фоторегистрирующих приборов, то для диапазона 0,2–1,0 мкм предлагается использовать приборы с зарядовой связью с «виртуальной» фазой, для диапазона 1,2–5,3 мкм — инфракрасные приборы с зарядовой связью с термоэлектрическими холодильниками (Пельтье) [15], для диапазона 8–14 мкм — микроболометрические модули [10].

Для измерения температуры энергонагруженных областей промышленных изделий требуется выбрать температурный диапазон 500–3000 К [4, 9]. Однако в зонах с повышенной радиацией под действием ионизирующего потока спектральные составляющие теплового излучения материалов могут излучать и в видимой и даже в ультрафиолетовой областях. Различные материалы (например, металлы) в зависимости от химических свойств и строения атома имеют собственный спектр излучения, и он может находиться в различных частях рассматриваемых диапазонов. К тому же с ростом температуры спектральная плотность излучения смещается от инфракрасного диапазона в сторону ультрафиолетового. По этой причине для большей достоверности и оперативности контроля термообстановки предлагается поднять максимально возможную отслеживаемую температуру до 9500 К и тем самым использовать спектральный диапазон от 0,3 до 5,3 мкм.

На рис. 3 представлена функциональная схема передающей части видеотелеметрической системы измерения температуры. Она включает два типа видеокамер, отличающиеся друг от друга спектральными диапазонами и разрешениями фоторегистрирующих устройств и материалами изготовления объективов. Модули сбора информации получают информационные потоки (или видеосигналы)



АФУ — антенно-фидерное устройство,  
 ВИ — видеоинформация,  
 ТМИ — телеметрическая информация о состоянии приборов из состава ТВТС

Рис. 3. Функциональная схема видеотелеметрической системы измерения температуры

от видеокамер, производят их оцифровку (при необходимости) и осуществляют временное хранение видеоинформации.

Перед передачей информации по беспроводному каналу необходимо провести ее помехоустойчивое кодирование и сжатие, что осуществляет модуль обработки видеоинформации. В табл. 4 приведен обзор алгоритмов сжатия видеоинформации [7, 14].

Перейдем к приемной части видеотелеметрической системы измерения температуры. Функциональная схема блока измерения температуры представлена на рис. 4. Видеоинформация в аппаратуре отображения информации поступает на устройство дешифрации пакетов с частотой 1–3 кад/с, на выходе которого имеем значение яркости. Рассматриваемая область изображения разбита на зоны. Общее количество точек поля изображения, определяемое разрешением фоторегистрирующего прибора, делится на зоны площадью от  $5 \times 5$  пикселей до  $20 \times 20$  пикселей. Выбор требуемой зоны для отслеживания температуры осуществляется либо оператором, либо в автоматическом режиме при введении порогового значения температуры при программировании процессора видеотелеметрической системы. По информации о яркости или цветности объекта (как правило, серого

цвета<sup>1</sup>) в данной зоне и результатам ее сравнения с матрицей энергий световых излучений в решаю-

<sup>1</sup>Все тела в природе частично отражают падающее на их поверхность излучение и поэтому не относятся к абсолютным черным телам. Если коэффициент температурного изменения удельного сопротивления одинаков для всех длин волн и меньше единицы ( $\alpha(\lambda, T) = \alpha_T = \text{const} < 1$ ), то такое тело называется серым. Коэффициент температурного изменения удельного сопротивления не черного тела зависит только от температуры тела, его материи и состояния его поверхности. Согласно [4], «для определения поглощательной способности тел по отношению к электромагнитным волнам определенной длины волны вводится понятие **коэффициента монохроматического поглощения** — отношение величины поглощенной поверхностью тела энергии монохроматической волны к величине энергии падающей монохроматической волны:

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{W_{\text{погл}}(\lambda, T)}{W_{\text{пад}}(\lambda, T)}. \quad (5.8)$$

Величина  $\alpha(\lambda, T)$  может принимать значения от 0 до 1. Кирхгофом было показано, что для всех тел, независимо от их природы, отношение спектральной плотности энергетической светимости к коэффициенту монохроматического поглощения является той же универсальной функцией длины волны и температуры  $f(\lambda, T)$ , что и спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$\frac{r(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = f(\lambda, T). \quad (5.9)$$

Таблица 4. Алгоритмы сжатия видеoinформации

Параметр	MPEG-2	JPEG2000	H.264
Преобразование	Дискретное косинус-преобразование	Дискретное вейвлет-преобразование	Преобразование Адамара и целочисленное дискретное косинус-преобразование
Обработка видеоизображения	Внутрикадровая статистическая, межкадровое кодирование и использование вектора движения при предсказании	Внутрикадровая статистическая	Внутрикадровая статистическая, межкадровое кодирование и использование вектора движения при предсказании
Рекомендуемая область применения	Кодирование видеоизображений	Кодирование статических изображений	Кодирование динамических изображений прямоугольного формата
Возможность сжатия без потерь	Есть	Есть	Есть
Типичный диапазон степеней сжатия	15–50	20–150	40–200
Степень сжатия с заметными потерями разрешения	Свыше 1 : 50	Свыше 1 : 150	Свыше 1 : 200
Вычислительная сложность	Средняя	Средняя	Высокая
Недостатки	Небольшая эффективность сжатия	Необратимые потери информации при больших степенях сжатия	Сложные алгоритмы, высокая ресурсоемкость при кодировании и декодировании

щем устройстве с учетом длины волны вычисляется значение яркостной (спектральной) температуры в данной зоне [3].

Термодинамическая температура контролируемой зоны поля изображения объекта наблюдения определяется сравнением полученных значений с данными калибровочных соотношений спектральной пирометрии [11].

## Заключение

Таким образом, термо-видеотелетрическая система — это система видеотелетри для измерения температуры (излучения физических тел<sup>1</sup> —

<sup>1</sup>Интегральный коэффициент излучения зависит от температуры. Для диэлектриков  $\varepsilon(T)$  с ростом температуры обычно убывает. Это связано с тем, что показатель преломления

объектов) бесконтактным методом в широком температурном диапазоне оптическими методами

материала растет с температурой. Однако электрическая проводимость металла уменьшается с ростом температуры из-за теплового возбуждения молекулярной решетки, что вызывает увеличение  $\varepsilon(T)$ . Для воды  $\varepsilon$  не меняется и равен примерно 1, а для графита  $\varepsilon \approx 0,95–0,98$ . Известно приближенное выражение для интегрального коэффициента излучения в зависимости от температуры для металлов [5]:

$$\varepsilon(T) \approx 0,5737\sqrt{\rho(T)T} - 0,1769\rho(T)T, \quad (6.10)$$

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha(T - 293)), \quad (6.11)$$

где  $\rho(T)$  — удельное сопротивление металла в зависимости от температуры,  $\rho_0$  — удельное сопротивление металла при температуре 20 °С (293 К),  $\alpha$  — коэффициент теплового изменения удельного сопротивления.



Рис. 4. Функциональная схема блока измерения температуры

по интегральному коэффициенту излучения<sup>1</sup> энергонагруженных промышленных изделий.

Отличительными особенностями термо-видеотелеметрии наблюдаемого объекта являются:

- бесконтактное измерение температуры;
- широкий диапазон измерения температуры точек объекта;
- визуальное представление температурного распределения по поверхности объекта наблюдения;
- наглядное представление о динамике температуры поверхности объекта в целом;
- оперативное обнаружение аномальных температурных зон.

Видеотелеметрические системы измерения температуры позволят существенно сократить количество температурных датчиков и кабелей, одновременно повысив количество и качество получаемой информации о температуре энергонагруженных элементов объекта или изделия ведением как точечного, так и зонного наблюдений для отслеживания температурных параметров.

<sup>1</sup>Спектральный пирометр калибруется по излучению (на той же длине волны) абсолютно черного тела в градусах яркостной температуры  $T_{ij}$ , связанной с термодинамической шкалой соотношением [4]

$$\frac{1}{T_{ист_{ij}}} - \frac{1}{T_{ij}} = \frac{\lambda_{ij}}{1,438} \ln \varepsilon_{\lambda_{ij}}, \quad (7.12)$$

где  $T_{ист_{ij}}$  — истинное (откалиброванное) среднее значение температуры в контролируемой зоне поля изображения,

$$T_{ист_{ij}} = \frac{1,438 T_{ij}}{1,438 + \lambda_{ij} T_{ij} \ln \varepsilon_{\lambda_{ij}}}. \quad (7.13)$$

Применение термо-видеотелеметрии позволит увеличить контролируемую площадь поверхности контролируемого объекта промышленного изделия с одновременным расширением диапазона измеряемых температур и сокращением информационного потока о температуре. Термо-видеотелеметрия обеспечит оперативный анализ штатных, нештатных и аварийных ситуаций за счет отслеживания аномальных температурных зон в энергонагруженных областях по видеоизображению поверхности рассматриваемого изделия.

В статье предложен метод измерения температуры энергонагруженных областей объектов наблюдения термо-видеосистемой, при этом:

- введены определения, касающиеся видеотелеметрического контроля промышленных изделий;
- разработана обобщенная функциональная схема видеотелеметрической системы;
- разработана функциональная схема передающей части видеотелеметрической системы измерения температуры;
- сформулированы требования по спектральному диапазону термо-видеотелеметрической системы для измерения температуры энергонагруженных областей промышленных изделий;
- разработана функциональная схема блока измерения температуры видеотелеметрической системы;
- проведен сравнительный анализ существующих алгоритмов сжатия видеoinформации;
- сформулированы требования к применению термо-видеотелеметрической системы и ее отличительные особенности.

## Список литературы

1. Назаров А.В. Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс / А.В. Назаров, Г.И. Козырев, И.В. Шитов и др. СПб: Наука и техника, 2007. 672 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1979. Т. 3. 537 с.
3. Климов Д.И., Благодарев В.А. Использование инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов для отслеживания температурных параметров КА и РН // Успехи современной радиоэлектроники, 2012, № 12. С. 22–26.
4. Таблицы физических величин под ред. академика И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1009 с.
5. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.
6. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Теоретические основы теплотехники». Лабораторная работа №7 «Измерение температуры бесконтактными методами». Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. Институт механики и энергетики. 10 с.
7. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 368 с.
8. Протокол № 62/03 «Оценки методических положений измерения температуры поверхности нагретых объектов с термоизолирующим покрытием THERMAL COAT». Отдел строительной физики и ресурсосбережения НИИ строительных конструкций. Киев, 2003. 9 с.
9. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные системы измерения температуры. М.: Энергоатомиздат, 1988. 248 с.
10. Коротяев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В. Основы тепловидения. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012. 123 с.
11. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. Изд. третье, перераб. и доп. М.: Наука, 1965. 248 с.
12. Климов Д.И., Благодарев В.А. Термовидеосистема для установки на космические аппараты и ракетно-носители // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 3. С. 76–83.
13. Климов Д.И., Благодарев В.А. Оценка возможности использования существующих объективов для проецирования видеоизображения на фоторегистрирующие приборы // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2015, т. 16, № 8. С. 63–71.
14. Jan Ozer J. H. 264 Royalties: what you need to know. Streaming Learning Center, 2009. P. 1.
15. Вишневецкий Г.И., Выдревич М.Г., Нестеров В.К., Ривкин В.Л. Отечественные УФ и ИК ФПЗС и цифровые камеры на их основе // Электроника: наука, технология, бизнес, 2003, № 8. С. 18–24.