

ВИРТУАЛЬНАЯ ТЕПЛОВИЗИОННАЯ СИСТЕМА С МИКРОСЕКУНДНЫМ ПЕРИОДОМ РЕГИСТРАЦИИ

А.В. Долматов, А.О. Маковеев, К.А. Ермаков, В.В. Лавриков

Югорский государственный университет
г. Ханты-Мансийск

В статье рассматривается способ исследования высокотемпературных быстропротекающих процессов с помощью цифровой камеры «Видеоспринт» и пакета вычислительной математики Matlab.

Ключевые слова: Пирометрия, обработка изображения, высокоскоростная видеокамера.

Одним из основных инструментов для наблюдения за высокотемпературными процессами является тепловизор оптического диапазона. Он позволяет следить за динамикой тепловых полей на границе объекта исследований, диагностировать его состояние и прогнозировать дальнейшее развитие [1]. Если при этом процесс протекает с высокой скоростью, то качество тепловизионных измерений определяется не только пространственным разрешением прибора, но и периодом регистрации температурных изображений. Задача увеличения временной разрешающей способности тепловизионных систем для экспериментальной физики быстропротекающих процессов не утрачивает своей актуальности по сей день [2, 3, 4].

Цель работы – разработка на базе скоростной цифровой камеры «ВидеоСпринт» и пакета вычислительной математики MATLAB тепловизионной системы для исследования высокотемпературных быстропротекающих процессов.

В настоящее время разработано достаточно разнообразие цифровых видеосистем с высоким пространственным и временным разрешением. Большинство таких камер поддерживают стандартный интерфейс, позволяющий интегрировать их в качестве устройства ввода видеоданных в компьютер. Обработка информации на компьютере с помощью оригинальных методик превращает подобную систему в уникальный виртуальный прибор для научных исследований.

Монохромная цифровая камера «ВидеоСпринт» построена НПК «ВИДЕОСКАН» на основе ПЗС с пространственным разрешением 1280x1024 пикселя. Датчик камеры имеет линейную зависимость электрического сигнала от светового потока. Экспозиция, период съемки, усиление и смещение видеосигнала являются управляемыми парамет-

рами. Это позволяет фиксировать коэффициент преобразования сигнала и после калибровки по температурному образцу использовать камеру в качестве тепловизионной системы.

Для исследования быстропротекающих процессов важно, что в камере «ВидеоСпринт» регулируется не только экспозиция, но и период регистрации изображений в диапазоне от 2 мкс до 1 мс с шагом 2 мкс.

Последовательность изображений записывается во внутреннюю оперативную память камеры объемом до 6 Гб. По завершении регистрации данные переносятся в компьютер с помощью специализированного интерфейса на основе контроллера VS2001/TV, использующего шину PCI. Управление камерой в операционной системе Windows осуществляется посредством драйвера - библиотеки функций VS-LIB3, которая представлена производителем в пакете SDK [5].

В качестве программной платформы виртуальной тепловизионной системы авторами выбрана среда вычислительной математики MATLAB, имеющая широкие функциональные возможности в области обработки многомерных сигналов и математической статистики.

Таким образом, построение виртуальной тепловизионной системы требовало решения следующих задач:

- Интеграция камеры «ВидеоСпринт» в среду MATLAB в качестве источника данных;
- Разработка методики и программных средств калибровки камеры «ВидеоСпринт» по температурному образцу;
- Разработка класса объектов MATLAB для виртуализации тепловизионной системы и представления ее в качестве программного объекта с набором свойств и методов.

Для решения первой задачи использован стандарт MEX-файлов, с помощью кото-

рого возможно внедрение в MATLAB библиотеки функций пользователя. Программный модуль стандарта MEX представляет собой динамически подключаемую библиотеку с единственной экспортируемой функцией – `mexFunction`. Названию библиотеки должно соответствовать макрокоманда, которая будет использоваться в MATLAB [6].

Функция `mexFunction` имеет 4 аргумента, которые заполняются средой MATLAB в результате синтаксического анализа макрокоманды. Например, макрокоманда сценария

`[l,param]=VideoSprint(hVS,6,1,100);` (1)

приводит к следующим действиям:

- в каталогах среды осуществляется поиск файла `VideoSprint.dll` и его подключение к процессу `MATLAB.exe`;
- параметры, находящиеся слева от знака равно в квадратных скобках интерпретируются как выходные. Их количество сохраняется в переменной `nlhs`; выделяется память под указатели выходных переменных – `l` и `param`, а ссылки на них заносятся в массив `plhs`;
- параметры, в круглых скобках интерпретируются как входные. Их количество помещает в переменную `nrhs`; адреса областей памяти, где хранятся входные параметры помещаются в массив `prhs`;
- MATLAB находит в библиотеке `VideoSprint.dll` функцию `mexFunction` и запускает ее на исполнение с параметрами `nlhs`, `plhs*`, `nrhs`, `prhs*`.

Разработанная авторами библиотека `VideoSprint.dll` реализует следующие процедуры взаимодействия с «ВидеоСпринт»:

- `Open` – подключение в драйверу камеры и ее инициализация;
- `Close` – завершение работы с камерой и отключение от ее драйвера;
- `SetParam` – установка параметров камеры в соответствие с аргументами функции;
- `GetParam` – запрос текущих параметров камеры через ее драйвер;
- `Capture` – запуск захвата видеоданных;
- `Read` – перенос видеоданных из внутренней памяти камеры в трехмерный массив MATLAB.

Вызов всех процедур из библиотеки `VideoSprint.dll` осуществляется посредством `mexFunction`, в которой один из аргументов задает тип выполняемой операции. Так команда (1) запускает процедуру чтения из внутренней памяти камеры (6 – соответствует операции `Read`) кадров с 1 по 100, и пере-

дачу их в трехмерный массив. При этом в массив `param` передаются настройки камеры, при которых выполнялась регистрация.

Завершающей фазой виртуализации «ВидеоСпринт» в MATLAB явилась разработка М-класса объектов `vsFast`, который инкапсулирует механизм взаимодействия вычислительной среды с MEX-файлами и представляет камеру в виде набора свойств и методов. Конструктор класса осуществляет поиск и инициализацию видеосистемы, а также блокирует доступ в камере других программных модулей MATLAB до завершения работы с ней. Деструктор класса отвечает за корректное завершение работы с «ВидеоСпринт» и освобождение задействованных ресурсов. Конструктор и деструктор `vsFast` вызываются неявно при создании и разрушении объекта класса.

Набор свойств класса `vsFast` (период съемки, экспозиция, усиление и смещение видеосигнала, параметры кадров и т.д.) реализован с помощью `set`- и `get`-методов. Запись нового значения в свойство объекта класса `vsFast` приводит к вызову соответствующего `set`-метода, который выполняет настройку выбранного параметра видеосистемы. Чтение свойства объекта класса `vsFast` ведет к запросу этого параметра у контроллера камеры «ВидеоСпринт» посредством соответствующего `get`-метода.

Методами объекта класса `vsFast` являются функции `Capture` и `Read`. `Capture` сигнализирует цифровой камере о начале захвата изображений, количество которых задано его аргументом. Метод `Read` осуществляет произвольную выборку из множества зарегистрированных кадров, хранящихся в памяти цифровой камеры, и их перенос в трехмерный массив данных среды MATLAB. Первый параметр метода задает смещение от начала множества, а второй определяет количество передаваемых изображений.

Для иллюстрации работы с виртуальной цифровой камерой «ВидеоСпринт» рассмотрим следующие макрокоманды на языке сценариев MATLAB:

`cam=vsFast;` (2)

`cam.Expos=cam.Expos+40;` (3)

`cam.Capture(20);` (4)

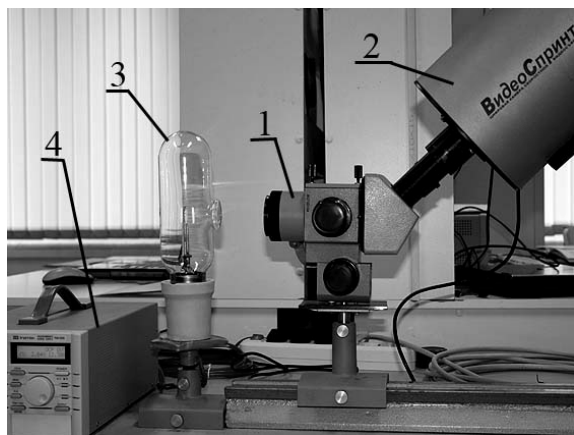
`[l,~]=cam.Read(6,10);` (5)

`clear cam;` (6)

Макрокоманда (2) создает объект класса `vsFast`. При этом конструктор класса, используя библиотеку `VideoSprint.dll`, производит соединение с камерой «ВидеоСпринт» и инициализирует ее. В макрокоманде (3) конст-

рукция `cam.Expos` правее знака равно приводит к вызову `get`-метода, который считывает текущее значение экспозиции камеры. Эта же конструкция левее знака равно способствует вызову `set`-метода, который устанавливает новое значение экспозиции непосредственно в камере «ВидеоСпринт». Макрокоманда (4) запускает захват 20 кадров, а (5) производит выборку и перенос в массив / 10 кадров, начиная с 6. Массив параметров камеры, действующих при регистрации, игнорируется. Макрокоманда (6) завершает работу с камерой, освобождая ее для других приложений, и очищает память MATLAB от объекта класса `vsFast`. Таким образом, после команды (6) работа с виртуальной камерой окончена, а зарегистрированные данные сохранены в массиве / и готовы к дальнейшей обработке.

Калибровки камеры «ВидеоСпринт» проводилась с использованием подхода яркостной пирометрии, который позволяет при фиксированных параметрах оптоэлектронного тракта уровень видеосигнала сопоставить яркость свечения теплового объекта и его температуру [7, 8]. Авторами разработан комплекс автоматизированной калибровки, который состоит из температурной лампы ТРУ-1100-2350, источника тока PSH-2035 и цифровой камеры «ВидеоСпринт» (рис. 1).



Условные обозначения:

1 – микроскоп МБС-10, 2 – камера «ВидеоСпринт», 3 – температурная лампа ТРУ-1100-2350, 4 – программируемый источник питания PSH-2035

Рисунок 1 – Комплекс калибровки тепловизионной системы для исследования процесса CBC

Интерфейс удаленного управления PSH-2035 позволил авторам спроецировать источник питания в MATLAB в виде виртуально-ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №2 2012

го прибора посредством класса объектов `csETLamp`. Конструктор класса `csETLamp` осуществляет соединение через коммуникационный порт с источником PSH-2035, во внешней цепи которого имеется лампа ТРУ-1100-2350. Деструктор класса отвечает за корректное завершение работы с источником питания и освобождение системных ресурсов. Единственный метод класса `Current` предназначен для получения квазиравновесного тока в вольфрамовой ленте температурной лампы.

Регулировка тока в методе `Current` осуществляется в три этапа посредством управления выходным напряжением прибора PSH-2035. На первом этапе производится грубая настройка тока до уровня, который незначительно превышает требуемую величину. На следующем этапе осуществляется плавное снижение тока к заданному уровню с погрешностью 0.02A. На третьем этапе выполняется тонкая подстройка напряжения с увеличивающейся временной задержкой, которая позволяет стабилизировать ток через температурную лампу на заданном уровне (интервал, в течении которого ток остается постоянным, значительно больше времени регистрации камерой «ВидеоСпринт» серии кадров).

Довольно сложная процедура получения квазиравновесного тока температурной лампы обусловлена недостаточной разрешающей способностью PSH-2035 по напряжению и относительно длительным интервалом установления равновесия между конвективными потоками охлаждения вольфрамовой ленты внутри колбы и внешней средой.

Динамика тока температурной лампы во время калибровки тепловизионной системы показана на рисунке 2. Горизонтальные полочки на графике соответствуют эталонным токам температурной лампы ТРУ-1100-2350, для которых известны значения яркостной температуры вольфрамовой ленты.

Методика калибровки виртуальной тепловизионной системы реализована в виде сценария `vsCalibration`. Программная структура комплекса калибровки приведена на рисунке 3.

Предварительный дисперсионный анализ отклика камеры «ВидеоСпринт» по экспозиции, частоте кадров, усилению и смещению видеосигнала выявил следующее:

- уровень сигнала не зависит от частоты кадров (периода регистрации), а определяется экспозицией;

• уровень шума не зависит от экспозиции, а определяется усилением видеосигнала. Таким образом, в методике калибровки варьируются три основных параметра: усиление видеосигнала, экспозиция и эталонные уровни тока образцової лампы, соответствующие ее яркостной температуре. Фактор усиления влияет на температурное разрешение тепловизионной системы, а экспозиция – на смещение диапазона измеряемых температур.

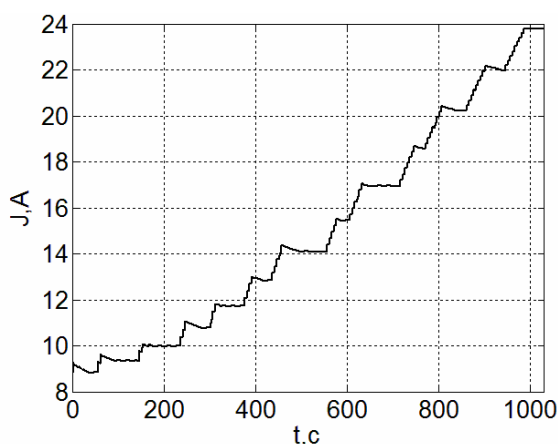


Рисунок 2 – Динамика тока температурной лампы ТРУ-1100-2350 в процессе калибровки

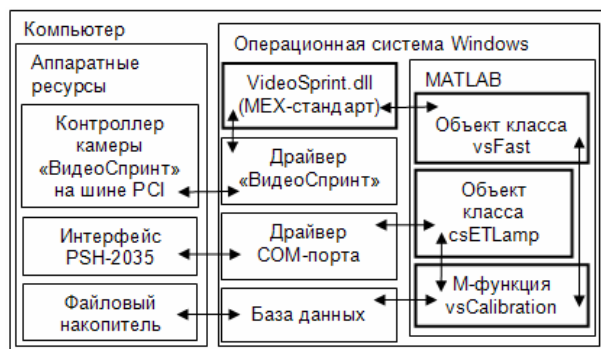


Рисунок 3 – Программная структура комплекса калибровки

Сценарий калибровки выполняется в два этапа: коррекция «геометрического» шума фотоприемника и построение пространства состояний виртуальной тепловизионной системы.

В ходе первого этапа камера размещается на стенде, который обеспечивает равномерную засветку ее фотоприемника. С помощью автоматизированного эксперимента на каждом уровне усиления определяется смещение видеосигнала камеры, а также матрицы аддитивной и мультипликативной

поправок для коррекции динамического диапазона каждого элемента фотоприемника. Полученные параметры помещаются сценарием калибровки в базу данных. В процессе измерения смещение видеосигнала корректируется аппаратными средствами камеры, а регулировка динамического диапазона ячеек фотоприемника осуществляется в MATLAB на основе следующей модели:

$$I'_{ij} = K_{\alpha ij} \cdot (I_{ij} - I_{\alpha ij}^{\min}), \quad (7)$$

где I_{ij}, I'_{ij} – зарегистрированный и исправленный сигнал фотозлемента с координатами (i, j) , $K_{\alpha ij}, I_{\alpha ij}^{\min}$ – мультипликативная и аддитивная поправки для элемента (i, j) и уровня усиления α .

Стенд второго этапа калибровки камеры показан на рисунке 1. Начинается этап регистрацией в базе данных характеристик оптического тракта тепловизионной системы. В ходе калибровки определяются среднее значение $\bar{S}$ и дисперсия σ_s^2 сигнала по всему множеству пиксел серии изображений как функции усиления, экспозиции и температуры вольфрамовой ленты лампы. На основе этих данных сценарий MATLAB синтезирует дискретные пространства состояний и погрешностей тепловизионной системы – зависимости температуры наблюдаемого объекта $T(\alpha, \varepsilon, s)$ и ее погрешности $\Delta T(\alpha, \varepsilon, s)$ от относительного уровня яркости s , усиления электронного тракта α и экспозиции ε (рис. 4). В итоге получаются две трехмерные матрицы значений, которые размещаются в калибровочной базе данных.

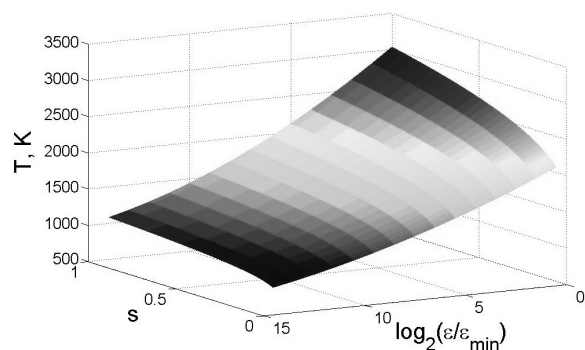
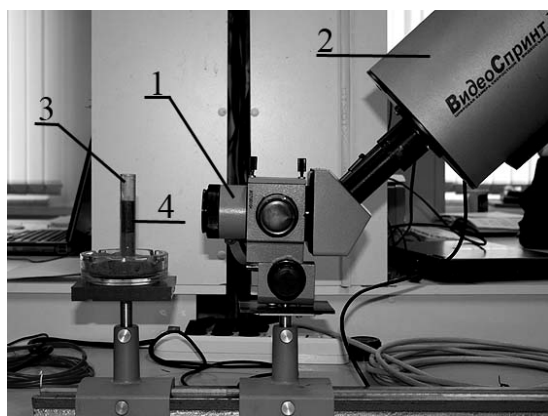


Рисунок 4 – Пространство состояний виртуальной тепловизионной системы при относительном уровне усиления $\alpha = 96$

В период эксплуатации виртуальной тепловизионной системы выбирается одна из оптических подсистем, внесенных в БД во время калибровки, задаются константы усиления α и экспозиции ε . На основе этих параметров из базы данных запрашиваются матрицы поправок сигнала и таблица преобразования измеряемых градаций яркости в температурное множество. Таким образом, по завершению регистрации серии изображений в них остается заменить значения яркости на соответствующие температуры, чтобы получить пространственную динамику температурного поля на поверхности объекта исследования.

Авторами разработан класс *piroFast*. Он является наследником виртуальной видеосистемы *vsFast* и расширяет его метод *Read* способностью преобразования яркостных изображений в температурные на основе взаимодействия с калибровочной базой данных. В итоге работы с объектом класса *piroFast* пользователь получит серию температурных изображений в виде трехмерного массива среды MATLAB.

Виртуальная тепловизионная система апробирована в ходе исследований процесса СВС пористой металлокерамики. Экспериментальная установка показана на рисунке 5.



Условные обозначения:
1-микроскоп МБС-10, 2- камера «Видео-Спринт», 3 – кварцевая трубка, 4 – шихта

Рисунок 5 – Экспериментальная установка для исследования процесса СВС

В качестве оптического канала тепловизионной системы использован микроскоп МБС-10 с горизонтально направленной оптической осью объектива (1). Шихта (4) из металлических порошков *Ni* и *Al* дисперсностью

10-100 мкм засыпается в кварцевую трубку (3), которая располагается вертикально в фокальной плоскости микроскопа (1). Процесс синтеза инициируется сверху с помощью сильно экзотермической реакции горения диборида титана в атмосфере воздуха. Дальнейшее распространение процесса поддерживается теплом, выделяющимся в ходе образования продуктов реакции. Максимальное пространственное разрешение тепловизионной системы такой конфигурации составляет 5 мкм на пиксел, а период регистрации может изменяться в диапазоне от 150 мкс до 1 мс.

Результаты регистрации пространственной динамики температуры на поверхности реагирующей шихты представлены на рис. 6.



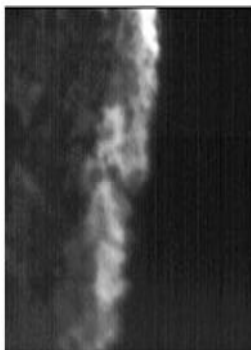
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6 – Тепловизионная съемка процесса СВ-синтеза пористой металлокерамики (развитие идет сверху вниз; $\varepsilon = 150$ мкс; период регистрации 400 мкс)

Разделение в научных приборах функций получения и обработки данных, и передача функции обработки компьютеру способствовали возникновению виртуальных измерительных систем. Дальнейшее их развитие видится авторам в применении коммуникационные и вычислительные технологии.

В виртуальной тепловизионной системе управление калибровочной базой данных может осуществляется специализированным сервером компьютерной сети, а методы обработки данных реализованы в виде векторизованных алгоритмов среды MATLAB для параллельных вычислений. Это позволяет использовать такие технологии как CUDA и облачные вычисления для минимизации отклика виртуальной тепловизионной системы на входной поток данных, получаемый ее регистратором – цифровой камерой «Видео-Спринт».

Таким образом, структура виртуальной тепловизионной системы позволяет масштабировать ее как по числу измерительных ка-

налов, определяемых количеством регистраторов подключенных к вычислительной сети, так и по производительности, определяемой числом параллельных потоков преобразования яркости пиксел серии изображений в температуру на основе единой калибровочной базы данных вычислительной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evstigneyev V.V., Gulyaev P.Y., Mukhachev A.B., Garkol D.A. A new procedure of high-rate brightness pyrometry for studying the shs processes. - Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1994. T. 30. № 1. С. 72.
2. Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Иордан В.И. Разрешающая способность виртуальных приборов контроля температуры частиц в плазменных потоках по суммарному тепловому спектру.- Ползуновский альманах. 2008. № 2. С. 13-14.
3. Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Автоматизация контроля теплофизических параметров в технологиях детонационного напыления.- Системы управления и информационные технологии. 2009. № 1.2 (35). С. 230-233.
4. Gulyaev I.P., Solonenko O.P., Gulyaev P.Y., Smirnov A.V. Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface.- Technical Physics Letters. 2009. T. 35. № 10. С. 885-888.
5. <http://www.videoscan.ru>
6. <http://matlab.exponenta.ru>
7. Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления.- Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 5-2. С. 382-385.
8. Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Попов В.А., Леонов Г.Н. Методы оптической диагностики частиц в высокотемпературных потоках. - Ползуновский вестник. 2012. № 2-1. С. 4-7.

Долматов Алексей Викторович – к.т.н., доцент, тел.: (3467) 35-77-97, e-mail: shs_lab@ugrasu.ru;
Ермаков Кирилл Андреевич – студент;
Макоев Антон Олегович – студент; **Лавриков Виталий Вячеславович** – студент