

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 621.398 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.4.90.96

**Тенденции развития видеотелеметрических систем
для измерения температуры термонагруженных областей
средств выведения**

Д. И. Климов, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Т. Т. Мамедов, к. т. н., tamedov.tt@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

И. Р. Губайдуллин, gubaydullin_ir@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время появление публикаций, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию систем видеоконтроля изделий ракетно-космической техники вызвано известным фактом о наиболее достоверном канале информации — зрении (зрение человека дает 95 % информации об окружающих объектах), поэтому включение в систему контроля видеоинформации значительно повышает достоверность информации от существующих средств телеметрирования объектов для отслеживания их штатного функционирования, а также для оперативного и однозначного выявления причин нештатных и аварийных ситуаций, возникающих в процессе полета средств выведения.

В статье предлагается способ обработки информации с видеотелеметрической системы о температуре термонагруженных элементов ракет-носителей и разгонных блоков удаленным бесконтактным методом с визуальным представлением посредством преобразования сигнала, получаемого с видеокамер, основанный на принципе работы цветковых пирометров и распределении Планка. Для реализации алгоритма обработки видеоинформации для вычисления температуры разработана структурная схема решающего устройства. Представлена методика представления видеоинформации и температурных измерений при условии наличия цветного видеоизображения с пониженной частотой кадров и широкого спектрального диапазона.

Ключевые слова: видеотелеметрия, термо-видеотелеметрия, температура, пирометрические методы, ракеты-носители, разгонные блоки, средства выведения

**Trends in the Development of Video Telemetry Systems
for Measuring the Temperature of Thermally Loaded Areas
of Launch Vehicles**

D. I. Klimov, Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

T. T. Mamedov, Cand. Sci. (Engineering), tamedov.tt@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

I. R. Gubaidullin, gubaydullin_ir@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. Nowadays the appearance of publications, scientific and research, and also research and development works on the creation of video monitoring systems for rocket and space technology products is caused by a well-known fact about the most reliable information channel — vision (human vision provides 95 % of information on surrounding objects), hence the inclusion of video information in the control system significantly increases the reliability of information from existing telemetry facilities of objects to track their normal functioning, as well as for rapid and unambiguous identification of the causes of abnormal and emergency situations that occur during the flight of rocket and space technology products.

The article proposes a method for processing information from a video telemetry system about the temperature of thermally loaded elements of launch vehicles and upper stages by a remote contactless method with visual representation by converting a signal received from video cameras based on the principle of color pyrometers and Planck distribution. To implement the algorithm for processing video information for calculating the temperature, a block diagram of the solver is developed. A method for presenting video information and temperature measurements is presented provided that there is a color video image with a reduced frame rate and wide spectral range.

Keywords: video telemetry, thermo video telemetry, temperature, pyrometric methods, launch vehicles, upper stages

Общие положения

В настоящее время ведется множество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по визуальному контролю технологических процессов, сопровождающих движение ракет-носителей (РН) (например, отделение ступеней, обтекателя, полезная нагрузка и пр.) [1]. Стоит отметить, что в процессе эксплуатации ракеты она подвергается воздействию внешних факторов, которые необходимо контролировать посредством информационно-измерительных систем. Основным внешним воздействующим фактором, влияющим на параметры конструкционных материалов, является температура. В настоящее время на практике применяются температурные датчики в сочетании с локальными коммутаторами температуры (ЛКТ).

С недавних пор предлагается посредством сигналов, получаемых с видеокамер, осуществлять и измерения физических величин удаленным бесконтактным методом. В средствах выведения существуют области или объекты, средняя температура которых в рабочем режиме превышает 1200–1500 К (например, области наружной оболочки ракет-носителей, подвергающиеся сильному механическим воздействиям).

Для таких областей контактный метод измерения температуры посредством температурных датчиков неприменим ввиду значительного выделения энергии в том или ином виде (тепловой, кинетической и пр.). При этом обозначенные объекты наиболее предрасположены к возникновению нештатных и аварийных ситуаций. Следовательно, необходима система, контролирующая бесконтактным методом температуру проблемной области и правильность протекания технологических процессов разделения составных частей космического объекта, раскрытия конструкций (солнечных батарей, антенн), маневрирования космических объектов на борту средств выведения.

Предлагается от видеоконтроля перейти к видеоизмерениям, в частности температуры, построив термо-видеотелеметрическую систему [2, 3]. Термо-видеотелеметрия (ТВТ) позволит обеспечить оперативный анализ нештатных ситуаций за счет отслеживания аномальных температурных зон по видеоизображению поверхности рассматриваемого

изделия, получаемому с борта ракет-носителей и разгонных блоков (РБ) (например, газогенераторы и насосы ракетного двигателя — области ракетного двигателя, подвергающиеся воздействию высоких температур).

Информация о термообстановке наблюдаемого термонагруженного объекта ракеты-носителя нуждается в обработке и представлении в виде температурных измерений и цветных изображений распределения температурных полей, поэтому предлагается способ обработки информации о температуре наблюдаемого объекта, основанный на принципе работы цветных пирометров.

Сравнительный анализ систем видеоконтроля, предназначенных для эксплуатации в средствах выведения

В исследованиях по тематике систем видеоконтроля для средств выведения проведен сравнительный анализ систем видеоконтроля производства Rocket Cam Ecliptic Enterprises Corporation [4], ОСАМ-2 Kayser-Threde [5], АО «ИРЗ» (система БСВК) [6], а также рассмотрены основные характеристики автономной системы видеоконтроля (АСВК) производства АО «Российские космические системы» (табл. 1). Как видно из таблицы, АСВК предполагает большее разрешение фоторегистрирующего прибора по сравнению с аналогами и применение динамического алгоритма сжатия видеoinформации H.264, с резервированием опорного кадра на один–два шага.

У всех четырех систем одинаковый принцип построения. Они состоят из видеокамер, устройства обработки и передающего устройства (см. рис. 1).

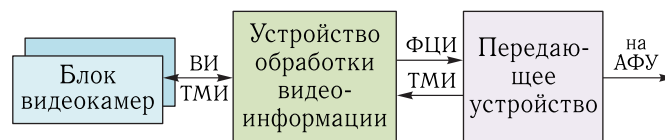


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема видеоконтроля

Таблица 1. Сравнительный анализ существующих систем видеоконтроля

№	Наименование характеристики	Значение характеристики			
		Иностранное производство		Отечественное производство	
		RocketCam Ecliptic Enterprises Corporation (США) [4]	ОСАМ-2 Kayser-Threde (Германия) [5]	БСВК АО «ИРЗ» [6]	АСВК АО «РКС»
1	Количество подключаемых видеокамер	до 8	до 4	3	до 7
2	Разрешение фоторегистрирующего устройства, пикс	768 × 494	720 × 576	от 320 × 240 до 2048 × 1536	от 720 × 576 до 1280 × 960
3	Частота следования кадров, кадр/с	25	25	16	до 25
4	Алгоритм сжатия видеоизображения	JPEG MJPEG	JPEG 2000	JPEG MJPEG	MJPEG H.264
5	Емкость буферного ЗУ	–	–	20 Мб	4 Гб
6	Масса системы, не более, кг	4,5	12*	10**	6

* – масса с учетом двух передатчиков и двух видеокамер;

** – масса с учетом передатчика.

Что касается систем измерения температуры посредством сигнала, получаемого с видеокамер (термо-видеотелетметрические системы), то до настоящего времени в космической промышленности они не применялись как в нашей стране, так и за рубежом. По данной тематике практически отсутствуют публикации, но тем не менее проводится множество опытно-экспериментальных работ и регулярно обновляются теоретическая база и методы измерений, так как температура — ключевой фактор, влияющий на параметры конструкционных материалов.

Основное внимание в доступных источниках (например, [7–14]) при использовании видеосредств уделяется защите видеокамер от радиационного излучения, в отдельных случаях видеокамеры используются для выявления на вокзалах и аэропортах пассажиров с повышенной температурой, а также для отслеживания температуры в газовых потоках и трубопроводах. В то же время не выявлено применение видеокамер для измерения температуры термонагруженных элементов промышленных объектов или в особенности объектов РКТ в широком диапазоне (например, от 300 до 5000–7000 К). К тому же при наблюдении, как правило, используются только инфракрасный и видимый диапазоны излучаемого спектра нагретых тел.

Неудачные пуски РН в 2013–2016 годах (например, 02.06.2013, 16.05.2014, 16.05.2015 — «Протон-М», 01.02.2013 — «Зенит-3SL», 22.08.2014 — «Союз-СТ-Б», 01.12.2016 — «Союз-У») показывают, что существующих средств телеметрирования состояния объектов (для однозначного оперативного заключения о причинах аварий) недостаточно, поэтому появление исследовательских работ и разработка методов измерения температуры термонагруженных элементов РКТ посредством видеотелетметрии весьма актуальны и их результаты заслуживают быстрого внедрения.

Термо-видеотелетметрия позволит обеспечить оперативный анализ нештатных ситуаций за счет отслеживания аномальных температурных зон по видеоизображению поверхности рассматриваемого изделия, получаемому с борта КА и РН.

Таким образом, причиной выбора данного направления исследований является необходимость видеоконтроля наиболее важных процессов, сопровождающих движение КА и РН, в том числе контроль термообстановки перспективных средств выведения.

Отличительными особенностями термо-видеотелетметрии являются:

- бесконтактное измерение температуры;
- широкий диапазон измерения температуры точек объекта;

- визуальное представление термообстановки объекта наблюдения;
- наглядное представление о динамике термообстановки объекта в целом;
- оперативное обнаружение аномальных температурных зон.

Методика измерения температуры энергонагруженных областей

Информацию о термообстановке предполагается отображать на экране монитора ПЭВМ в виде цветного видеоизображения. Для этого вычисление температуры пирометрическими методами должно быть основано на принципах работы пирометров спектрального отношения или цветовых пирометров, а именно определения температуры по величине отношения интенсивностей излучения в двух длинах волн λ_1 и λ_2 [7, 15]. Чувствительность метода тем выше, чем шире спектральный диапазон, то есть чем меньше λ_1 и больше λ_2 .

Алгоритм вычисления температуры основан на планковском распределении в диапазоне длин волн, а именно [15].

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

Металлы, как правило, имеют малый коэффициент излучения в инфракрасной области, который обычно увеличивается с ростом температуры металла. Спектральный коэффициент излучения ε_λ металла увеличивается с уменьшением его электрической проводимости. Электрическая проводимость металла уменьшается с ростом температуры из-за теплового возбуждения молекулярной решетки, что вызывает увеличение коэффициента излучения [15].

Выразим отношение интенсивностей текущего изображения в рассматриваемой зоне и «холодного» изображения

$$\frac{Y_{\text{хол}}}{Y_{ij}} = \left(\frac{\lambda_{ij}}{\lambda_{\text{хол}}} \right)^5 \cdot \frac{e^{\frac{hc}{kT_{ij}\lambda_{ij}} - 1}}{e^{\frac{hc}{kT_{\text{хол}}\lambda_{\text{хол}}} - 1}}. \quad (2)$$

Зная $T_{\text{хол}} = T_{\text{ср}} = 20^\circ\text{C}$, найдем T_{ij} из (1):

$$T_{ij} = \frac{c_1}{\lambda_{ij}} \frac{1}{\ln \left[1 + \frac{Y_{\text{хол}}}{Y_{ij}} \left(\frac{\lambda_{\text{хол}}}{\lambda_{ij}} \right)^5 \left(e^{\frac{hc}{kT_{\text{хол}}\lambda_{\text{хол}}}} - 1 \right) \right]}. \quad (3)$$

Для отображения видеоинформации в части отслеживания термообстановки объекта при наземной обработке информации требуется применить алгоритм пересчета длин волн из инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов в видимый диапазон длин волн, основанный на законе смещения Вина:

$$b = T\lambda, \quad (4)$$

где b — постоянная Вина, равная $2896 \text{ мкм} \times \text{K}$.

Отсюда:

$$T = b/\lambda. \quad (5)$$

Следовательно, чем длиннее волна, тем ниже температура. Напомним:

$$T, \text{ K} = t, ^\circ\text{C} + 273. \quad (6)$$

Пересчет длин волн в видимый спектр производится в соответствии с соотношением [16]:

$$\lambda_{\text{вд}} = \frac{(\lambda - \lambda_{\text{min}})\Delta\lambda_{\text{вд}}}{\Delta\lambda_{\text{пд}}} + \lambda_{\text{min_вд}}, \quad (7)$$

где λ — текущее значение длины волны, λ_{min} — минимальное значение величины длины волны в выбранном диапазоне, $\Delta\lambda_{\text{вд}}$ — ширина видимого диапазона волн, $\Delta\lambda_{\text{вд_min}}$ — минимальное значение длины волны видимого диапазона, $\Delta\lambda_{\text{пд}}$ — ширина выбранного диапазона.

В результате получается видеоизображение, пример которого показан на рис. 2. Наибольший интерес представляют области поля изображения, отображаемые при обработке, окрашенные в темно-фиолетовый цвет или черные окружности, окаймленные темно-фиолетовым цветом.

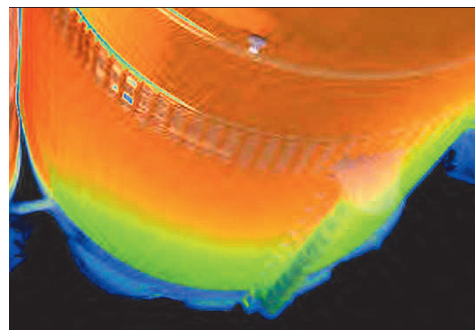


Рис. 2. Синтезированное цветное изображение, получаемое термо-видеотелетрической системой

Методика отображения информации о термообстановке

Просмотр оператором видеоизображения в реальном времени необходим для анализа видеоизображения с возможностью определения температуры в интересующей области объекта (КА, РН).

Интерфейс программы должен включать следующие составляющие.

1. Опция выбора зоны обзора с соответствующим обозначением. Расположение в соответствии с зонами обзора термонагруженных элементов средств выведения задается в эксплуатационной документации (ЭД) на «Программу отображения видеоинформации (ВИ) для отслеживания термообстановки элементов средств выведения».

2. Опция выбора спектрального поддиапазона. Спектральные поддиапазоны задаются в соответствии с табл. 1, каждому из них соответствует свой температурный диапазон.

Подобное разбиение поддиапазонов осуществляется относительно длин волн, справочных величин диапазонов (ближний ультрафиолетовый, видимый и пр.) [15, 16], а также на основе анализа существующих фоторегистрирующих приборов и объективов [17, 18].

Для оперативного выявления термонагруженных зон объекта наблюдения при контроле за температурными параметрами предлагается применение фоторегистрирующих устройств низкого разрешения (например, 256×290 , 352×288) преимущественно ближнего и среднего инфракрасного диапазонов с частотой 1–3 кад/с [17].

Наибольшее внимание уделяется нагретым телам с температурой выше 250–300 °С (в табл. 1 приведены значения температур, при которых происходит необратимое изменение структуры кристаллической решетки и температур плавления для наиболее часто используемых материалов при проектировании средств выведения) [19]. При более низких температурах подробного детального анализа поверхности нагретого тела (до точки) не требуется. Достаточно ограничиться небольшой областью поля изображения. Для менее детального изучения термообстановки в средней и дальней ИК-области достаточно видеть окаймленные пурпурным цветом области черного цвета на экране, на вкладке ИК2

(использование инфракрасных приборов с зарядовой связью — ИК ПЗС), чтобы отследить спектральную температуру ниже 525 К в максимуме потока теплового излучения [15]. Можно отследить и меньшие значения температуры при рассматриваемой длине волны излучения, причем минимально возможная температура, которую можно отследить, определяется также и чувствительностью ПЗС. Чувствительность ПЗС, в свою очередь, определяется уровнем шумов ПЗС (преимущественно шумами считывания). Значения температур, приведенные в табл. 2, требуют особого внимания при отслеживании оператором термообстановки после наземной обработки видеоинформации, так как в окрестности данных температур происходит разрушение того или иного материала [20].

Для отслеживания термообстановки в выбранной области изображения предлагается установить по две разнесенные на некоторое расстояние ВК в защитном термокожухе: одна с ВФПЗС (прибором с зарядовой связью с «виртуальной фазой»), другая — с ИК ПЗС [17]. Обе камеры должны быть настроены на одну и ту же область обзора и пересылать на наземную станцию одновременно получаемые потоки информации [20]. В табл. 3 приведены поддиапазоны длин волн, соответствующие моделям ПЗС и объективам.

Наряду с визуальным контролем, предлагается измерение высоких температур, а также контроль резких температурных перепадов телеметрируемых объектов для более детального анализа нештатных и аварийных ситуаций. Измерения осуществляются способом, основанным на законе Планка, пиромет-

Таблица 2. 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

Таблица 3. Поддиапазоны длин волн, соответствующие моделям ПЗС и объективам

Наименование поддиапазона	Диапазон длин волн, мкм	Диапазон цветовых (спектральных) температур*, К	Тип видеорегистратора	Тип объектива
УФ	0,3–0,38	9653–7621	ВК с ВФПЗС	Длиннофокусный объектив из кварцевого стекла
ВД	0,38–0,74	7621–3914		
ИК1	0,74–1,10	3914–2630		
ИК2	1,10–5,5	2630–525	ВК с ИК ПЗС	Длиннофокусный объектив из оптического кремния
ИК3	5,5–8,0	525–362	ИК-системы с глубоким термоохлаждением	Длиннофокусный объектив из германия
ИК4	8,0–15,0	362–190	Микроболометрические приемники	

* — температурные диапазоны берутся в максимуме интенсивности теплового излучения, получены в соответствии с законом смещения Вина.

рическими методами по цветовому спектру или яркости. На экране монитора ПЭВМ отображается цветное (или черно-белое) видеоизображение с частотой до 3 кад/с, при этом термоопасные зоны поля изображения подсвечиваются красным цветом.

Данные способы контроля наблюдаемых объектов позволяют осуществлять видеоконтроль технологических процессов и термообстановки средств выведения, а также измерять температуру термонагруженных областей удаленным бесконтактным методом посредством видеокамер при существенном сокращении информационного потока, поступающего от изделия на наземную приемную станцию по каналу «борт–Земля» и выдавать разовые команды на повторное выполнение операций развертывания составных частей автоматического космического аппарата в случае их невыполнения согласно циклограмме с целью оперативного предотвращения нештатных и аварийных ситуаций.

Следует отметить, что применительно к использованию видеокамер на борту средств выведения, при расположении видеокамер на больших расстояниях от наблюдаемого объекта, возможно применение длиннофокусных объективов [21]. При уменьшении расстояния от объекта до объектива, чтобы сохранить модель и исполнение объектива, требуется увеличить глубину резкости, то есть увеличить диафрагменное число путем уменьшения действующего отверстия объектива. В программе должно быть предусмотрено задание номинальной температуры — температуры, при которой материал дли-

тельное время сохраняет свою работоспособность. Она зависит от материала, из которого изготовлен наблюдаемый объект и входящие в него компоненты. Номинальная температура задается заранее.

3. Опция отображения температуры в выбранной оператором зоне.

Таким образом, действия оператора при пользовании программой должны быть следующими:

- выбор зоны обзора в соответствии с ЭД;
- выбор спектрального поддиапазона;
- выбор интересующей области зоны обзора для измерения температуры.

Выводы

В ходе работы были получены следующие результаты:

- обозначены причины необходимости развития и применения видеосистем на средствах выведения;
- разработана методика вычисления температуры по интенсивности теплового излучения на различных длинах волн, которая позволяет вычислять значения температуры наблюдаемых объектов удаленным бесконтактным методом;
- разработана методика отображения информации о термообстановке при получении цветного видеоизображения и численных значений температур, позволяющая визуализировать термообстановку наблюдаемого объекта и оперативно определять термоопасные зоны;

– представлены спектральные диапазоны в соответствии с реально существующими фоторегистрирующими приборами и оптическими материалами, которые являются входными данными для разработки программы отображения информации о термообстановке.

Список литературы

1. Климов Д.И., Мамедов Т.Т. Система видеоконтроля для эксплуатации на ракетах-носителях // XV конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» 11–13 апреля 2018 года: Сб. трудов. М.: ИКИ РАН, 2018. С. 31–36.
2. Климов Д.И. Видеотелеметрический контроль промышленных изделий // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 2. С. 89–98.
3. Климов Д.И. Измерение физических величин, характеризующих факторы воздействия на промышленные изделия, удаленным бесконтактным методом // Радиотехника, 2018, № 2. С. 80–84.
4. Rocket Cam. Digital video system — Ecliptic Enterprises Corporation — 2002. 4 p. <http://www.eclipticenterprises.com/rocketcam> (Дата обращения 28.09.2020).
5. OCAM-2 Online Camera System. ARQUIMEA DEUTSCHLAND GmbH. 2013. 5 p. <https://www.ohb.de/news/2019/ganz-nah-dran-ohb-kamera-system-filmt-oneweb-satelliten-im-all> (Дата обращения 28.09.2020).
6. Бортовая система видеоконтроля для ракет-носителей и разгонных блоков БСВК // Сайт ООО «ИРЗ». www.irz.ru/products/11/500.htm (Дата обращения 25.09.2020).
7. Фрунзе А.В. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения // Фотоника, 2009, № 4. С. 32–37.
8. Хвиужов М.А., Галашев А.Н. Расчет температуры нагрева поверхности пыльного диска при осуществлении пирометрического контроля // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2013, № 4 (334). С. 60–65.
9. Ткаченко А.В. Дистанционное измерение температуры в поле СВЧ // Наука, образование, бизнес. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, 2013, № 1. С. 235–238.
10. Лобода Е.Л., Рейно В.В. Исследование оптико-физических характеристик высокотемпературных сред инфракрасными методами // Известия вузов. Физика, 2012, т. 55, № 9-2. С. 195–197.
11. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Диагностика тепловым методом электротехнического оборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, 2012, № 4. С. 51–58.
12. Горелик Л.И., Соляков В.Н., Тренин Д.Ю., Тренина Е.О. Измерение температуры двухдиапазонным тепловизионным прибором на основе матричных фотоприемных устройств // Прикладная физика, 2012, № 3. С. 95–100.
13. Багаутдинов В.Р., Ураксеев М.А. Методы контроля ходовой части железнодорожного транспорта. Тепловизионный метод // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2012, № 10 (97). С. 5–10.
14. Берг И.А., Худяков П.Ю., Чулков А.О. Бесконтактная диагностика пульсирующего факела на автоматизированном комплексе // Современные наукоемкие технологии, 2016, № 11-1. С. 9–14.
15. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.
16. Климов Д.И., Благодарёв В.А. Представление температурных диапазонов нагретых элементов конструкций космического аппарата в видимом диапазоне длин волн с учетом интегрального коэффициента теплового излучения // Электромагнитные волны и электронные системы, 2014, т. 19, № 3. С. 62–65.
17. Вишневский Г.И., Выдревич М.Г., Нестеров В.К., Ривкинд В.Л. Отечественные УФ и ИК ФПЗС и цифровые камеры на их основе // Электроника: наука, технология, бизнес, 2003, № 8. С. 18–24.
18. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В. Основы тепловидения. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012. 123 с.
19. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1965. 248 с.
20. Климов Д.И., Благодарёв В.А. Термовидеосистема для установки на космические аппараты и ракеты-носители // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 3. С. 76–83.
21. Jaime Esper, Thomas P. Flatley, James B. Bull Small Rocket/Spacecraft Technology (SMART) Platform // 25-th Annual AIAA/USU Conference on small satellites. SSC11-VII-6.7p. [https://www.semanticscholar.org/paper/SSCI-IVII-6-Small-Rocket-%2F-Spacecraft-Technology-\(%20Esper-Flatley/722b2ed96c5f096e7b1fae7252d770e24d5a1a6b](https://www.semanticscholar.org/paper/SSCI-IVII-6-Small-Rocket-%2F-Spacecraft-Technology-(%20Esper-Flatley/722b2ed96c5f096e7b1fae7252d770e24d5a1a6b) (Дата обращения 28.09.2020).