



Методы и системы оптико-физические измерений (в условиях априорной неопределенности)

М. М. Кугейко, В. Л. Козлов., В. А. Фираго, Н. Л. Згировская
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В обзоре представлены разработанные авторами на основе концепции «безаприорности» оптико-электронные методы и системы различного функционального назначения, позволяющие максимально исключить априорную информацию или допущения об исследуемом объекте при интерпретации измерительной информации, а также «бескалибровочные» измерительные системы, устойчивые к изменению аппаратурных констант приемо-излучающих, регистрирующих блоков, окружающей среды, загрязнению оптических элементов.

Ключевые слова: оптико-физические измерения, концепция «безаприорности», методы и системы, лазерно-локационные, базисные и нефелометрические, пассивные различного функционального назначения, бескалибровочные

Статья получена: 27.05.2020

Принята к публикации: 28.08.2020

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптико-физические измерительные системы широко используются в разнообразных областях науки, техники, народного хозяйства. При проведении оптико-физических измерений информация об измеряемом объекте или среде получается на основании анализа отраженного, рассеянного, преломленного или поглощенного электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн.

Существующие оптико-физические системы обладают следующими недостатками:

- влияние шумов и погрешностей измерений приводит к некорректности обратной задачи

Methods and Systems of Optical and Physical Measurements (in Conditions of a priori Uncertainty)

M. M. Kugeiko, V. L. Kozlov., V. A. Firago, N. L. Zgirovskaya
Belorussian State University, Minsk, Belarus

The review presents optical and electronic methods and systems of various functional purpose developed by the authors on the basis of the “a priori-free” concept, which make it possible to exclude a priori information or assumptions about the object under study in the interpretation of measurement information, as well as “non-calibration” measuring systems that are resistant to changes in the instrumentation constants of reception radiating, recording blocks, environment, pollution of optical elements.

Key words: optical and physical measurements, the concept of “a priori-free”, methods and systems, laser-location, basic and nephelometric, passive for various functional purposes, “non-calibration”

Received on: 27.05.2020

Accepted on: 28.08.2020

INTRODUCTION

Currently, optical and physical measuring systems are widely used in various fields of science, technology, and the national economy. When carrying out optical and physical measurements, information about the measured object or medium is obtained based on the analysis of the reflected, scattered, refracted or absorbed electromagnetic radiation in the optical wavelength range.

The existing optical and physical systems have the following disadvantages:



при интерпретации измерительной информации;

- отсутствуют методы и алгоритмы решения некорректных обратных задач по восстановлению определяемых параметров, работающие в реальном масштабе времени;
- необходимость использования большого количества априорной информации об объекте исследования;
- трудности метрологической аттестации систем.

В связи с этим в задаче обработки данных оптико-физических измерений необходима разработка таких способов обработки информации, которые позволили бы максимально исключить априорную информацию или допущения об исследуемом объекте, необходимость внесения поправок на фон и дрейф показаний приборов, влияния окружающей среды, или иначе, методов обработки информации, базирующейся на концепции «безаприорности» [1-3]. Суть данной концепции касательно задачи интерпретации данных оптико-физических измерений заключается в минимальном использовании априорной информации или допущений об исследуемой среде, получении опорных (калибровочных) значений определяемых параметров без проведения дополнительных независимых измерений, решении проблемы калибровочных измерений (максимальном исключении влияния аппаратных параметров на результаты измерений).

ПРОБЛЕМА КАЛИБРОВОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Вопросы калибровки измерительных систем возникают в большинстве случаев экспериментальных измерений. В практическом плане они выливаются в проблему метрологической аттестации системы. Для некоторых случаев решение вопроса метрологической аттестации является даже более сложным, чем создание самой измерительной системы.

Обычно измерительная система содержит источник излучения энергии и приемную часть, которая преобразует принимаемую энергию в измеряемый сигнал. Преобразование энергии в измеряемый сигнал и вывод его в форме, удобной для восприятия, осуществляется в виде неизвестной зависимости от множества параметров. Целью калибровки и является установление вида этой зависимости. Математически это выражается в том, что величина выводимого сигнала включает как константы источников, приемников, так и константы всего тракта преобразования информации, значения которых и необходимо установить. Все эти кон-

- The influence of noise and measurement errors leads to the incorrectness of the inverse problem when interpreting the measurement information;
- There are no methods and algorithms for solving incorrect inverse problems of recovering the determined parameters operating in real time;
- The need to use a large amount of a priori information about the research object;
- Difficulties in metrological certification of systems.

In this regard, in the task of processing optical and physical measurements, it is necessary to develop such methods of information processing that would maximally exclude a priori information or assumptions about the object under study, the need to make corrections for the background and drift of instrument readings, environmental influences, or otherwise, methods information processing based on the concept of “a priori-free” [1-3]. The essence of this concept regarding the problem of interpreting the data of optical and physical measurements is the minimum use of a priori information or assumptions about the investigated medium, obtaining the reference (calibration) values of the determined parameters without additional independent measurements, solving the problem of calibration measurements (maximally eliminating the influence of instrumental parameters on the measurement results).

CALIBRATION MEASUREMENT PROBLEM

Calibration issues for measuring systems arise in most cases of experimental measurements. In practical terms, they result in the problem of metrological certification of the system. In some cases, the solution to the issue of metrological certification is even more difficult than the creation of the measuring system itself.

Typically, a measuring system contains a source of energy radiation and a receiver part that converts the received energy into a measured signal. Conversion of energy into a measured signal and its output in a form convenient for perception is carried out in the form of an unknown dependence on many parameters. The purpose of calibration is to establish the type of this dependence. Mathematically, this is expressed in the fact that the magnitude of the output signal includes both the constants of sources, receivers, and the constants of the entire information conversion path, the values of which must be set. All these constants



станты с течением времени и изменением условий эксперимента могут меняться, что еще больше усложняет проблему калибровки.

Данные недостатки устраняются исключением зависимости от влияния среды, аппаратурных констант, загрязнений и т.п. Очевидна отсюда актуальность создания «бескалибровочных» измерительных систем (максимально устраняющих зависимость от отмеченных только что влияний) [3]. «Бескалибровочной» же измерительная система, в свою очередь, может быть только в том случае, если она будет максимально устойчива к изменению аппаратурных констант.

В лазерно-локационных измерениях задача обработки информации подразумевает не только установление функциональных связей между получаемой информацией и определяемой характеристикой, включающих аппаратурные константы системы, но и интерпретацию получаемой косвенной информации об исследуемом объекте (т.е. решение обратной задачи. Практически во всех случаях задача интерпретации получаемой косвенной информации является многопараметрической и часто некорректной обратной задачей [4].

Для ее решения здесь требуется знание опорных (калибровочных) значений определяемых оптических характеристик путем дополнительных измерений или же из самих сигналов обратного рассеяния (без проведения дополнительных независимых измерений). В частности, предложено использовать сигналы обратного рассеяния от перекрывающихся хотя бы на величину ширины канала регистрации интервалов. Подробно методы установления опорных (интегральных и локальных) калибровочных значений рассмотрены в [5].

В связи со сказанным суть концепции «безаприорности» касательно задачи интерпретации данных лазерно-локационного зондирования заключается в минимальном использовании априорной информации или допущений об исследуемой среде, максимальном исключении влияния аппаратуры и используемых физических процессов на результаты измерений, исключении опорных (калибровочных) значений определяемых параметров [1,5].

Таким образом, эффективное использование оптико-физических измерений в диагностике, контроле, в технических процессах, в научных исследованиях и т.п. требует разработки методов и систем, базирующейся на концепции «безаприорности», решения задач, позволяющих создание «бескалибровочных» измерительных систем.

can change over time and changes in experimental conditions, which further complicates the calibration problem.

These drawbacks are eliminated by excluding dependence on the influence of the environment, instrumental constants, pollution, etc. The urgency of creating “non-calibration” measuring systems (maximally eliminating dependence on the influences just noted) is obvious from this [3]. The measuring system, in its turn, can be “non-calibration” only if it is maximally resistant to changes in the hardware constants.

In laser-location measurements, the task of information processing implies not only the establishment of functional links between the received information and the characteristic being determined, including the hardware constants of the system, but also the interpretation of the obtained indirect information about the object under study (i.e., the solution of the inverse problem. In almost all cases, the problem of interpretation obtained indirect information is a multi-parameter and often incorrect inverse problem [4].

To solve it, knowledge of the reference (calibration) values of the determined optical characteristics is required by additional measurements or from the backscattered signals themselves (without additional independent measurements). In particular, it is proposed to use backscattered signals from intervals overlapping at least by the width of the recording channel. Methods for establishing reference (integral and local) calibration values are discussed in detail in [5].

In connection with the above, the essence of the concept of “a priori-free” with respect to the problem of interpreting the data of laser-ranging sounding is the minimum use of a priori information or assumptions about the studied medium, the maximum elimination of the influence of the equipment and the physical processes used on the measurement results, the exclusion of reference (calibration) values of the determined parameters [1,5].

Thus, the effective use of optical and physical measurements in diagnostics, control, in technical processes, in scientific research, etc. requires the development of methods and systems based on the concept of “a priori-free”, solving problems that allow the creation of “non-calibration” measuring systems.

The submissions received and submitted can be summarized as follows:



Полученные и представляемые материалы можно резюмировать следующим образом:

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Лазерно-локационные

В работах [1, 2, 6–14] предложены регрессионные методы решения обратных задач оптического зондирования светорассеивающих сред, заключающиеся в определении параметров исследуемой среды на основе аналитических выражений, аппроксимирующих связи искоемых параметров среды с измеряемыми в эксперименте оптическими сигналами. Эти выражения получают путем регрессионного анализа результатов статистического моделирования оптических сигналов при широкой вариации параметров среды. Важным достоинством такого подхода к интерпретации данных оптического зондирования является возможность восстановления параметров среды в режиме реального времени без привлечения для этого априорной информации (если реальные значения параметров среды не выходят за пределы выборки, используемой для получения статистического оператора решения обратной задачи). На получаемые регрессионные соотношения, к тому же, не влияют аппаратурные константы, связывающие рассчитываемые сигналы с параметрами рассеивающих сред.

Эффективность регрессионного подхода к решению обратных задач продемонстрирована в работах [1, 2], где путем численного моделирования оптических параметров аэрозоля при широкой вариации его микрофизических параметров установлены многочисленные регрессионные связи между оптическими, а также между оптическими и микрофизическими характеристиками многокомпонентных аэрозолей естественного и антропогенного происхождения.

Полученные регрессионные соотношения между оптическими, а также оптическими и микрофизическими характеристиками атмосферного аэрозоля хорошо согласуются с расчетными и экспериментальными данными глобальной сети мониторинга аэрозоля на основе сканирующих солнечных фотометров AERONET и известными экспериментальными оптико-микроструктурными корреляциями для стратосферного и приземного аэрозоля [8, 13].

На этой основе разработан ряд методов и методик определения микрофизических характеристик аэрозоля по данным лазерно-локационных, спут-

METHODS AND SYSTEMS OF OPTICAL AND PHYSICAL MEASUREMENTS IN CONDITIONS OF A PRIORI UNCERTAINTY

Laser-location

In [1, 2, 6–14], regression methods for solving inverse problems of optical sensing of light scattering media are proposed, which consist in determining the parameters of the medium under study on the basis of analytical expressions approximating the relationship of the required parameters of the medium with the optical signals measured in the experiment. These expressions are obtained by regression analysis of the results of statistical modeling of optical signals with a wide variation of the environmental parameters. An important advantage of this approach to the interpretation of optical sounding data is the ability to reconstruct the parameters of the medium in real time without using a priori information for this (if the real values of the parameters of the medium do not go beyond the sample used to obtain the statistical operator for solving the inverse problem). The obtained regression relations, moreover, are not affected by the hardware constants connecting the calculated signals with the parameters of the scattering media.

The effectiveness of the regression approach to solving inverse problems was demonstrated in [1, 2], where by numerical modeling of the optical parameters of aerosol with a wide variation of its microphysical parameters, numerous regression relationships were established between the optical, as well as between the optical and microphysical characteristics of multicomponent aerosols of natural and anthropogenic origin.

The obtained regression relations between the optical and optical and microphysical characteristics of atmospheric aerosol are in good agreement with the calculated and experimental data of the global aerosol monitoring network based on the AERONET scanning solar photometers and the known experimental optical-microstructural correlations for stratospheric and surface aerosols [8, 13].

Based on this, a number of methods and techniques have been developed for determining the microphysical characteristics of an aerosol from the data of laser-ranging, satellite, photometric and nephelometric measurements. In particular:

- a method for reconstructing the profiles of aerosol backscattering coefficients on horizontal and inclined paths in the atmosphere



никовых, фотометрических и нефелометрических измерений. В частности:

- метод восстановления профилей коэффициентов аэрозольного обратного рассеяния на горизонтальных и наклонных трассах в атмосфере из результатов зондирования лазерно-локационными системами на основе YAG:Nd³⁺-лазера, использующий установленную на основе статистической микрофизической модели городского и фонового аэрозолей регрессионную связь между спектральными значениями коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн 355; 532 и 1064 нм [15]. Разработанный метод может эффективно использоваться для мониторинга аэрозольных загрязнений атмосферы и для контроля дальности видимости по глиссаде в аэропортах;
- метод восстановления высотных профилей оптических и микрофизических параметров поствулканического стратосферного аэрозоля из результатов зондирования на длинах волн 355, 532 и 1064 нм [10]. Метод использует установленные на основе статистической оптико-микрофизической модели стратосферного аэрозоля устойчивые множественные регрессии между оптическими характеристиками аэрозоля и алгоритм восстановления профилей коэффициента аэрозольного обратного рассеяния на указанных длинах волн. Обратная задача решается с использованием полиномиальных множественных регрессий между интегральными микрофизическими параметрами аэрозоля и спектральными значениями коэффициентов обратного рассеяния;
- методы определения концентрации фонового атмосферного аэрозоля, основанные на измерении спектральных значений коэффициентов ослабления или коэффициентов обратного рассеяния (Патент BY10845 C1, 2008), а также коэффициентов рассеяния под углами (Патент BY10844 C1, 2008) и установлении регрессионных соотношений между определяемыми и измеряемыми параметрами;
- метод оперативного мониторинга массовой концентрации и эффективного размера пылевых частиц в аспирационном воздухе и отходящих газах на цементных заводах, основанный на измерении направленного рассеяния пылевыми частицами под углами 3, 5 и 15° на длинах волн 0,40 и 0,87 мкм [16]. Метод является устойчивым к нестабильности химического и дисперсного состава пыли, что

from the results of sounding by laser-ranging systems based on the YAG:Nd³⁺ laser, using the regression relationship between the spectral values of the backscattering coefficients established on the basis of a statistical-microphysical model of urban and background aerosols at wavelengths 355; 532 and 1064 nm [15]. The developed method can be effectively used to monitor aerosol air pollution and to control the visibility range along the glide path at airports;

- a method for reconstructing the altitude profiles of optical and microphysical parameters of postvolcanic stratospheric aerosol from the results of sounding at wavelengths of 355, 532 and 1064 nm [10]. The method uses the stable multiple regressions between the optical characteristics of the aerosol established on the basis of a statistical optical-microphysical model of the stratospheric aerosol and an algorithm for reconstructing the profiles of the aerosol backscattering coefficient at the indicated wavelengths. The inverse problem is solved using polynomial multiple regressions between the integral microphysical parameters of the aerosol and the spectral values of the backscattering coefficients;
- methods for determining the concentration of background atmospheric aerosol, based on measuring the spectral values of the attenuation coefficients or backscattering coefficients (Patent BY10845 C1, 2008), as well as scattering coefficients at angles (Patent BY10844 C1, 2008) and establishing regression relations between the determined and measured parameters;
- a method of online monitoring of the mass concentration and effective size of dust particles in aspiration air and exhaust gases at cement plants, based on the measurement of directional scattering by dust particles at angles of 3, 5 and 15° at wavelengths of 0.40 and 0.87 μm [16]. The method is resistant to the instability of the chemical and dispersed composition of dust, which makes it possible to eliminate the need for recalibration of the device when it is used to control dust emitted during various technological operations;
- a method for determining the mass concentration of respirable aerosol particles in the atmosphere from the results of lidar sounding at wavelengths of the YAG:Nd³⁺ laser, using the established polynomial regressions between the coefficients of aerosol attenuation and



позволяет устранить необходимость перекалибровки прибора при его использовании для контроля пыли, выделяющейся при различных технологических операциях;

- метод определения массовой концентрации респирабельных частиц аэрозоля в атмосфере из результатов лидарного зондирования на длинах волн YAG:Nd³⁺-лазера, использующий установленные полиномиальные регрессии между коэффициентами аэрозольного ослабления и обратного рассеяния на длинах волн 355; 532 и 1064 нм (Патент ВУ14094 С1, 2008);
- метод дистанционного определения массовых концентраций фракций атмосферного аэрозоля (PM_{1,0}, PM_{2,5} и PM₁₀) по данным совместных измерений лидарных сигналов на длинах волн 355; 532, 1064 и 2130 нм, обработке измерительной информации с использованием регрессионных связей с линейно-независимыми компонентами данных спектральных измерений (Евразийский патент 026024 В1, 2014);
- метод определения массовой концентрации аэрозоля (Евразийский патент 026528 В1, 2014). Использует посылку светового излучения на длинах волн 532 и 1064 нм, измерение коэффициентов направленного рассеяния для углов 5 и 20° и регрессионные соотношения, связывающие концентрации с регистрируемыми коэффициентами направленного рассеяния;
- метод восстановления высотного профиля объемной концентрации мелкодисперсной фракции аэрозоля напрямую из лидарных сигналов на длинах волн упругого и комбинационного рассеяния без использования дополнительных данных для калибровки лидара и для доопределения обратной задачи [17]. Позволяет с погрешностями в единицы процентов восстанавливать высотный профиль объемной концентрации мелкодисперсных частиц аэрозоля и параметры их распределения по размерам из лидарных сигналов на длинах волн Nd:YAG³⁺-лазера, а с привлечением каналов регистрации комбинационного рассеяния атмосферным азотом – еще и КПП аэрозольного вещества. Показано, что получаемой информации достаточно для расчетов оптических параметров аэрозоля, влияющих на перенос солнечного излучения в атмосфере.

Разработанные методы являются устойчивыми к вариациям дисперсного и химического состава исследуемых аэрозолей, к погрешностям оптических измерений и позволяют выполнять опера-

backscattering at wavelengths 355; 532 and 1064 nm (Patent BY14094 C1, 2008);

- a method for remote determination of mass concentrations of atmospheric aerosol fractions (PM_{1,0}, PM_{2,5} and PM₁₀) based on data from joint measurements of lidar signals at wavelengths of 355; 532, 1064 and 2130 nm, processing of measurement information using regression relationships with linearly independent components of spectral measurement data (Eurasian patent 026024 B1, 2014);
- a method for determining the mass concentration of aerosol (Eurasian patent 026528 B1, 2014). It uses the sending of light radiation at wavelengths of 532 and 1064 nm, the measurement of directional scatter coefficients for angles of 5 and 20° and regression relations that relate concentrations to the recorded directional scatter coefficients;
- a method for reconstructing the height profile of the volumetric concentration of a finely dispersed aerosol fraction directly from lidar signals at elastic and Raman scattering wavelengths without using additional data for calibrating the lidar and for completing the determination of the inverse problem [17]. Allows, with an error of a few percent, to reconstruct the altitude profile of the volume concentration of fine aerosol particles and the parameters of their size distribution from lidar signals at wavelengths of the Nd:YAG³⁺ laser, and with the use of channels for registering Raman scattering by atmospheric nitrogen – also the complex refractive index (CRI) of aerosol matter. It is shown that the information obtained is sufficient for calculating the optical parameters of aerosol that affect the transfer of solar radiation in the atmosphere.

The developed methods are resistant to variations in the disperse and chemical composition of the investigated aerosols, to errors in optical measurements and allow real-time local and remote monitoring of aerosol microphysical parameters with the accuracy required for practice.

“Non-calibration” basic and nephelometric methods

In the theory of measurements, it is customary to distinguish between direct and indirect, as well as joint and aggregate measurements, which differ in the way of processing experimental data [3]. Joint and cumulative measurements by the methods of finding the desired values of the determined quan-



тивный локальный и дистанционный мониторинг микрофизических параметров аэрозоля с необходимой для практики точностью.

«Бескалибровочные» базисные и нефелометрические методы

В теории измерений принято различать прямые и косвенные, а также совместные и совокупные измерения, которые отличаются способом обработки экспериментальных данных [3]. Совместные и совокупные измерения по способам нахождения искомого значения определяемых величин близки: и в том, и в другом случае их находят путем решения системы уравнений, коэффициенты в которых и отдельные члены получены из экспериментальных данных. Основное отличие состоит в том, что при совокупных измерениях одновременно определяют несколько одноименных величин, а при совместных – разноименных.

В [3–5] показано, что при использовании совокупных измерений за счет использования комбинаций одних и тех же приемно-излучающих и измерительных блоков и различного их местоположения исключаются зависимости от изменений их аппаратных констант. Использование данного свойства является основой синтеза структур новых «бескалибровочных» измерительных и диагностических систем, наиболее полно удовлетворяющих задаче метрологической аттестации и автоматизации процесса измерений. Так, в частности, разработаны:

- двухлучевой нефелометрический метод измерения оптической толщины рассеивающих сред (Патенты BY6450 C1, 2004; BY3670 C1, 2000);
- базисные «бескалибровочные» методы изменения оптических характеристик рассеивающих сред, их компонентного состава (Патент BY4655 C1, 2002);
- метод измерения индикатрис рассеяния подстилающей поверхности (Патент BY4120 C1, 2001);
- метод измерения коэффициента обратного рассеяния [3].

Разработанные базисно-нефелометрические методы измерения оптических характеристик позволяют исключить влияние (разброс) аппаратных констант на результат измерения и ослабляют требования к проведению калибровочных измерений. Эти важнейшие достоинства улучшают как точностные, так и эксплуатационные характеристики. Исключение калибровочных измерений, относящихся к наиболее сложной части, касающейся оптической составляющей, и устойчивость

ities are close: in both cases they are found by solving a system of equations, the coefficients in which and individual terms are obtained from experimental data. The main difference is that with aggregate measurements, several values of the same name are simultaneously determined, and with joint measurements, dissimilar ones.

It is shown in [3–5] that when using aggregate measurements, due to the use of combinations of the same receiving-emitting and measuring units and their different locations, dependences on changes in their instrumental constants are excluded. The use of this property is the basis for the synthesis of structures of new “non-calibration” measuring and diagnostic systems that most fully satisfy the task of metrological certification and automation of the measurement process. So, in particular, developed:

- two-beam nephelometric method for measuring the optical thickness of scattering media (Patents BY6450 C1, 2004; BY3670 C1, 2000);
- basic “non-calibration” methods for changing the optical characteristics of scattering media, their component composition (Patent BY4655 C1, 2002);
- a method for measuring scattering indicatrices of the underlying surface (Patent BY4120 C1, 2001);
- a method for measuring the backscattering coefficient [3].

The developed basic nephelometric methods for measuring optical characteristics make it possible to exclude the influence (spread) of instrumental constants on the measurement result and weaken the requirements for carrying out calibration measurements. These critical benefits improve both accuracy and performance. The exclusion of calibration measurements, which are the most difficult part concerning the optical component, and the resistance to the spread of the instrumental constants makes it possible to replace any of the blocks of the measuring system and not pay particular attention to the protection of optics from contamination.

Measuring and diagnostic methods based on two-wave semiconductor lasers

In spectral systems, e.g., gas analysis, a combination of radiation paths at the wavelengths used is required, which is easily achieved in two- and multi-wavelength semiconductor radiation sources. Within the framework of the concept of “a priori-free”, methods have been developed for construct-



к разбросу аппаратурных констант дает возможность заменять любой из блоков измерительной системы и особо не обращать внимания на защиту оптики от загрязнений.

Измерительные и диагностические на основе двухволновых полупроводниковых лазеров

В спектральных системах, например газового анализа, требуется совмещение путей прохождения излучения на используемых длинах волн, что легко достигается в двух- и многоволновых п/п источниках излучения. В рамках концепции «безаприорности» разработаны методы построения нефелометрического и базисного измерителей разного функционального назначения с использованием двухволнового полупроводникового лазера, обладающие расширенными возможностями [18]. К таким системам можно отнести:

- лазерный измеритель расстояний, в котором повышения точности достигается за счет учета скорости распространения излучения на трассе в данных метеоусловиях, основанный на определении разности частот одновременной рециркуляции на двух оптических длинах волн, находящихся вне полос аномальной дисперсии атмосферных газовых компонент, что обеспечивает уменьшение погрешности измерений дальности до 10^{-6} – 10^{-7} (Патенты РБ № 8172, № 3994);
- газоанализатор, принцип измерения которого основан на преобразовании амплитуды зондирующего импульса в разность частот одновременной рециркуляции на двух оптических длинах волн, одна из которых находится в полосе поглощения контролируемого газа, обеспечивающего чувствительность 10^{-3} – 10^{-4} ppb и измерение длины контролируемой трассы (Патент РБ № 7676, Патент РФ № 2480737);
- прецизионные лазерные дальнометры, основанные на: автоподстройке частоты следования зондирующих импульсов на двух оптических длинах волн; применении в качестве рециркулирующего линейно-частотно-модулированного импульса и обработке дистанционного сигнала согласованными фильтрами; использовании двух параллельных пучков зондирующего излучения на двух оптических длинах волн; применении двух каналов синхронного детектирования со сдвинутыми на $\pi/2$ тактовыми сигналами; использовании оптического аттенюатора и измере-

ing nephelometric and basic meters for various functional purposes using a two-wave semiconductor laser, which have advanced capabilities [18]. These systems include:

- a laser distance meter, in which an increase in accuracy is achieved by taking into account the propagation speed of radiation along the path in given meteorological conditions, based on determining the difference in frequencies of simultaneous recirculation at two optical wavelengths outside the bands of anomalous dispersion of atmospheric gas components, which ensures a decrease in the error in measuring the range up to 10^{-6} – 10^{-7} (Patents of the Republic of Belarus No. 8172, No. 3994);
- a gas analyzer, the measurement principle of which is based on converting the amplitude of the probe pulse into the difference in frequencies of simultaneous recirculation at two optical wavelengths, one of which is in the absorption band of the monitored gas, which provides a sensitivity of 10^{-3} to 10^{-4} ppb and measuring the length of the monitored path (Patent RB. No. 7676, RF patent No. 2480737);
- precision laser range finders based on automatic tuning of the repetition rate of probe pulses at two optical wavelengths; application as a recirculating chirp and processing of a remote signal with matched filters; using two parallel beams of probing radiation at two optical wavelengths; use of two channels of synchronous detection with clock signals shifted by $\pi/2$; using an optical attenuator and measuring the phase at different amplitudes of the optical signal (Patents RB No. 17091, 6490, 13549, 8914);
- Doppler two-frequency meters of motion parameters with a high spatial-temporal resolution, based on the use of various laws of modulation of sounding signals and allowing to simultaneously measure the range and speed of several objects in one sounding pulse (Patent RB No. 12740);
- Doppler speed meter on a two-wavelength laser, which provides measurement of both the exact value of the speed and the angle of direction of the object movement. Doppler meter for the frequency and amplitude of vibrations with a measurement accuracy less than $\lambda/2$ (Patent RB No. 10018);
- a meter for the chromatic dispersion of fiber-optic fibers, based on the conversion of dispersion into the difference in frequencies



- нии фазы при разных амплитудах оптического сигнала (Патенты РБ № 17091, 6490, 13549, 8914);
- доплеровские двухчастотные измерители параметров движения с высоким пространственно-временным разрешением, основанные на использовании различных законов модуляции зондирующих сигналов и позволяющие одновременно измерять дальность и скорость нескольких объектов за один зондирующий импульс (Патент РБ № 12740);
 - доплеровский измеритель скорости на двухволновом лазере, обеспечивающий измерение как точного значения скорости, так и угла направления движения объекта. Доплеровский измеритель частоты и амплитуды вибраций с точностью измерений меньше $\lambda/2$ (Патент РБ № 10018);
 - измеритель хроматической дисперсии волоконно-оптических световодов, основанный на преобразовании дисперсии в разность частот одновременной рециркуляции на двух оптических длинах волн, обеспечивающий точность измерения дисперсии $\sim 2\text{--}5 \cdot 10^{-2}$ пс·км/нм, и формирователь коротких оптических импульсов с использованием волоконного световода (Патенты РБ № 8171, 10703, 11002).

Пассивные измерительные системы различного функционального назначения

1. Разработаны оригинальные методы бесконтактного определения температуры тел при **неизвестном** коэффициенте их теплового излучения, основанные на использовании регистрации теплового излучения в нескольких участках спектра, применении ограничивающих условий и решении нелинейных уравнений. Разработанные методы внедрены в отечественный высокотемпературный термограф ИТЗ-СМ (см. рисунок) и освоено его мелкосерийное производство УП «Унитехпром БГУ» (www.augis.ru/www.unitehprom.by).

Для сложных условий измерения высоких температур при лазерной обработке металлов созданы оригинальные методы, основанные на регистрации абсолютной спектральной яркости излучения в области контакта лазерного пучка с обрабатываемой поверхностью, что позволяет существенно снизить неопределенность контроля температуры по сравнению с традиционной пирометрией спектрального отношения (Патенты BY13990, 13991, 2010).

of simultaneous recirculation at two optical wavelengths, providing an accuracy of measuring the dispersion of $\sim 2\text{--}5 \cdot 10^{-2}$ ps·km/nm, and a short optical pulse generator using a fiber light guide (Patents of RB No. 8171, 10703, 11002).

Passive measuring systems for various functional purposes

1. Original methods have been developed for the non-contact determination of the temperature of bodies with an unknown coefficient of their thermal radiation, based on the use of registration of thermal radiation in several parts of the spectrum, the use of limiting conditions and the solution of nonlinear equations. The developed methods have been introduced into the domestic high-temperature thermograph IT3-SM (see Figure), and its small-scale production by UE Unitechprom BSU has been mastered (www.augis.ru; www.unitehprom.by).

For difficult conditions for measuring high temperatures during laser processing of metals, original methods have been created based on recording the absolute spectral brightness of radiation in the area of contact of the laser beam with the surface being processed, which makes it possible to significantly reduce the uncertainty of temperature control in comparison with traditional spectral ratio pyrometry (Patents BY13990, 13991, 2010).

2. The principles of construction and functional structures of passive measuring systems for various functional purposes have been developed:
 - Hardware and software suit “BIZAN” [19]. Designed to measure the parameters of the traces of rifling fields on fired bullets. Provides measurement of track depth, distance between points, linear dimensions with a resolution of ~ 10 microns and measurement of angles of inclination of grooves with a resolution of $\sim 0.01'$ (Eurasian patent No. 028418). The suit was tested in the State Committee for Forensic Expertise of the Republic of Belarus. The suit is approved for use in the production of forensic ballistic examinations;
 - Rangefinder on a digital 3D camera (Eurasian patent No. 028167, RF patent No. 2485443). The range finder does not require the presence of calibration objects in the frame for measurements. Provides measurement of range, distance between objects, linear dimensions of all objects in a digital image and slope angles

2. Разработаны принципы построения и функциональные структуры пассивных измерительных систем различного функционального назначения:

- программно-аппаратный комплекс «БИЗАНЬ» [19]. Предназначен для измерения параметров следов полей нарезков на выстреленных пулях. Обеспечивает измерение глубины следа, расстояния между точками, линейных размеров с разрешением ~ 10 мкм и измерение углов наклона нарезков с разрешением $\sim 0,01'$ (Евразийский патент № 028418). Проведена апробация комплекса в Государственном комитете судебных экспертиз РБ. Комплекс разрешен к применению при производстве судебно-баллистических экспертиз;
- дальномер на цифровой 3D-фотокамере (Евразийский патент № 028167, Патент РФ № 2485443). Дальномер не требует наличия в кадре калибровочных объектов для проведения измерений. Обеспечивает измерение дальности, расстояния между объектами, линейных размеров всех объектов на цифровом изображении и углов наклона линий на изображении. Относительная неопределенность измерений 0,1% на расстояниях до 30 м и 0,3% на расстояниях до 100 м, что более чем в 10 раз превосходит известные аналоги [20, 21];
- система корреляционного анализа цифровых оптических изображений для решения задач криминалистики. Позволяет решать задачи криминалистики:
 - анализ подлинности и степени старения оттисков печатей и штампов (Евразийский патент № 026460);
 - анализ дефектов оттисков печатей на основе построения карты корреляции (Патент РБ № 11573);
 - анализ размерных параметров места происшествия по цифровому изображению с квадрокоптера (Патент РБ № 12181);
 - анализ искажений печати лазерных принтеров; идентификация принтеров (Патент РБ № 12107).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимость использования априорной информации, допущений об исследуемом объекте, сложности проведения калибровочных измерений в настоящее время например, не позволила метрологически аттестовать лазерно локационные системы в создаваемых глобальных сетях (мировой, европейской, СНГ, РБ) мониторинга загрязнений



Высокотемпературный термограф ИТЗ-СМ
High-temperature thermograph IT3-SM

of lines in the image. The relative measurement uncertainty is 0.1% at distances up to 30 m and 0.3% at distances up to 100 m, which is more than 10 times higher than the known analogs [20, 21];

- System of correlation analysis of digital optical images for solving problems of forensic science. Allows you to solve forensic tasks:
 - analysis of the length and aging degree of seals and stamps (Eurasian patent No. 026460);
 - analysis of defects of imprints of seals on the basis of the construction of a correlation map (Patent RB No. 11573);
 - analysis of the dimensional parameters of the scene of the accident from a digital image from a quadrocopter (Patent RB No. 12181);
 - analysis of distortions of laser printers; identification of printers (Patent RB No. 12107).

CONCLUSION

The need to use a priori information, assumptions about the object under study, the complexity of carrying out calibration measurements at the present time, e. g., did not allow metrological certification of laser-location systems in the created global networks (world, European, CIS, RB) for monitoring environmental pollution (for interpreting measurement information additional radiometric measure-



окружающей среды (для интерпретации измерительной информации используются дополнительные радиометрические измерения), системы неинвазивной оптической диагностики биофизических параметров биообъектов и т. д.

Таким образом, эффективное использование оптико-физических измерений в диагностике, контроле, в технических процессах, в научных исследованиях и т. п. требует разработки методов и систем, базирующейся на концепции «безаприорности», решения задач, позволяющих создание «бескалибровочных» измерительных систем. В представленном выше обзоре рассмотрены разработанные авторами на основе концепции «безаприорности» оптико-электронные методы и системы различного функционального назначения. Они устойчивы к изменению аппаратных констант, вариациям параметров окружающей среды. Эти разработки позволяют в условиях информационной неопределенности об объекте исследования проводить измерения с высокой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кугейко М. М., Лысенко С. А. *Лазерная спектрофелометрия аэродисперсных сред*. – Минск: БГУ, 2012: 208.
 2. Лысенко С. А. *Методы оптической диагностики биологических объектов*. – Минск: БГУ, 2014: 250.
 3. Кугейко М. М. *Лазерные системы (в условиях априорной неопределенности)*. – Минск: БГУ, 1999: 196.
 4. Кугейко М. М. Теория и методы оптико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред. – Минск: БГУ, 2003: 188.
 5. Кугейко М. М. *Лазерная диагностика и спектроскопия*. – Минск: БГУ, 2002: 276.
 6. Лысенко С. А., Кугейко М. М. Регрессионный подход к анализу информативности и интерпретации данных аэрозольных оптических измерений. *ЖПС*. 2009: 76(6); 876–883.
 7. Кугейко М. М., Лысенко С. А. Определение интегральных микрофизических параметров многокомпонентных аэрозолей по данным зондирования атмосферы локационными системами на основе Nd:YAG-лазера. *Оптика и спектроскопия*. 2009: 107(1); 166–172.
 8. Лысенко С. А., Кугейко М. М. Методика определения концентрации респираторной фракции атмосферного аэрозоля по данным трехчастотного лидарного зондирования. *Оптика атмосферы и океана*. 2010: 23(2); 149–155.
 9. Лысенко С. А., Кугейко М. М. Методика восстановления высотного распределения массовой концентрации аэрозоля в атмосфере из результатов лидарного зондирования на длинах волн Nd:YAG лазера. *Оптика и спектроскопия*. 2010: 109(6); 1212–1220.
 10. Лысенко С. А., Кугейко М. М. Восстановление оптических и микрофизических характеристик поствулканического стратосферного аэрозоля из результатов трехчастотного лидарного зондирования. *Оптика атмосферы и океана*. 2011: 24(4); 308–318.
 11. Лысенко С. А., Кугейко М. М. Восстановление массовой концентрации пыли в промышленных выбросах из результатов оптического зондирования. *Оптика атмосферы и океана*. 2011: 24(11); 960–968.
 12. Лысенко С. А., Кугейко М. М. Восстановление микрофизических параметров поствулканического стратосферного аэрозоля из результатов спутникового и наземного многочастотного зондирования. *Исследование Земли из космоса*. 2011: 5; 21–33.
 13. Лысенко С. А., Кугейко М. М. Определение концентрации аэрозольных частиц в вертикальном столбе атмосферы по спутниковым измерениям спектральной оптической толщины. *ЖПС*. 2011: 78(5); 793–800.
 14. Лысенко С. А., Кугейко М. М. Спектрофелометрические методы определения микрофизических характеристик пыли в аспирационном воздухе и отходящих газах цементных производств. *ЖПС*. 2012: 79(1); 66–76.
 15. Кугейко М. М., Лысенко С. А. Методика восстановления профилей аэрозольных коэффициентов обратного рассеяния атмосферы из результатов многоволнового лидарного зондирования. *ЖПС*. 2008: 75(3); 347–353.
 16. Лысенко С. А., Кугейко М. М. Спектрофелометрические методы определе-
- ments are used), systems for non-invasive optical diagnostics of biophysical parameters of biological objects, etc.
- Thus, the effective use of optical and physical measurements in diagnostics, control, in technical processes, in scientific research, etc. requires the development of methods and systems based on the concept of “a priori-free”, solving problems that allow the creation of “non-calibration” measuring systems. The above review also considers the optoelectronic methods and systems of various functional purposes, developed by the authors based on a priori-free concept, which are resistant to changes in instrumental constants and the environment, allowing measurements with high accuracy under conditions of information uncertainty about the research object.

REFERENCES

1. Kugeiko M. M., Lysenko S. A. *Laser spectronefelometry of aerodispersed media*. – Minsk: BSU. 2012: 208.
2. Lysenko S. A. *Methods of optical diagnostics of biological objects*. Minsk: BSU. 2014: 250
3. Kugeiko M. M. *Laser systems (under conditions of a priori uncertainty)*. – Minsk: BSU. 1999: 196.
4. Kugeiko M. M. *Theory and methods of optical and physical diagnostics of inhomogeneous scattering media*. – Minsk: BSU. 2003: 188.
5. Kugeiko M. M. *Laser diagnostics and spectroscopy*. – Minsk: BSU. 2002: 276.
6. Lysenko S. A., Kugeiko M. M. Regression approach to the analysis of information content and interpretation of aerosol optical measurement data. *ZhPS*. 2009: 76 (6); 876–883.
7. Kugeiko M. M., Lysenko S. A. Determination of the integrated microphysical parameters of multicomponent aerosols from atmospheric sounding data using Nd:YAG laser ranging systems. *Optics and spectroscopy*. 2009: 107 (1); 166–172.
8. Lysenko S. A., Kugeiko M. M. Method for determining the concentration of the respirable fraction of atmospheric aerosol according to the data of three-frequency lidar sounding. *Atmospheric and Ocean Optics*. 2010: 23 (2); 149–155.
9. Lysenko S. A., Kugeiko M. M. A technique for reconstructing the altitude distribution of the aerosol mass concentration in the atmosphere from the results of lidar sounding at Nd:YAG laser wavelengths. *Optics and spectroscopy*. 2010: 109 (6); 1212–12210.
10. Lysenko S. A., Kugeiko M. M. Recovery of optical and microphysical characteristics of postvolcanic stratospheric aerosol from the results of three-frequency lidar sounding. *Atmospheric and Ocean Optics*. 2011: 24 (4); 308–318.
11. Lysenko S. A., Kugeiko M. M. Recovery of mass concentration of dust in industrial emissions from the results of optical sensing. *Atmospheric and Ocean Optics*. 2011: 24 (11); 960–968.
12. Lysenko S. A., Kugeiko M. M. Recovery of microphysical parameters of post-volcanic stratospheric aerosol from the results of satellite and ground multi-frequency sounding. *Exploration of the Earth from space*. 2011: 5; 21–33.
13. Lysenko S. A., Kugeiko M. M. Determination of the concentration of aerosol particles in the vertical column of the atmosphere from satellite measurements of spectral optical thickness. *ZhPS*. 2011: 78 (5); 793–800.
14. Lysenko S. A., Kugeiko M. M. Spectronefelometric methods for determining the microphysical characteristics of dust in the suction air and exhaust gases from the cement plants of the fire protection department. *ZhPS*. 2012: 79 (1); 66–76.
15. Kugeiko M. M., Lysenko S. A. A technique for reconstructing the profiles of atmospheric backscattering aerosol coefficients from the results of multiwave lidar sounding. *ZhPS*. 2008: 75 (3); 347–353.
16. Lysenko S. A., Kugeiko M. M. Spectronefelometric determination methods microphysical characteristics of dust in the suction air and off-gas from the cement production facilities. *ZHPS*. 2012: 79 (1); 66–76.
17. Lysenko S. A., Kugeiko M. M., Khomich V. V. Multifrequency lidar sound-



- ния микрофизических характеристик пыли в аспирационном воздухе и отходящих газах цементных производств. *ЖПС*. 2012: 79(1); 66–76.
17. **Лысенко С. А., Кугейко М. М., Хомич В. В.** Многочастотное лидарное зондирование атмосферного аэрозоля в условиях информационной неопределенности. *Оптика атмосферы и океана*. 2016: 29(5); 404–413.
 18. **Козлов В. Л., Кугейко М. М.** Измерительные и диагностические системы на основе двухволновых полупроводниковых лазеров. – Минск: БГУ, 2010: 176.
 19. **Козлов В. Л., Рубис А. С., Лаппо Е. А., Васильчук А. С.** Применение корреляционной обработки цифровых изображений для оптимизации процесса измерения параметров и глубины следов нарезков на пулях. *Криминалистическая экспертиза*. 2015: 1; С. 31–38.
 20. **Козлов В. Л., Васильчук А. С.** Дальномер на основе цифровой 3D-фотокамеры для криминалистических исследований. *Датчики и системы*. 2015: 9; 70–76.
 21. **Kozlov V., Wojcik W., Zgirovskaya N.** About Improving the Measuring Distances Accuracy Based on Correlation Analysis of Stereo Images. *Proc. of XIth ISPC "Electronics and Information Technologies (ELIT)"*. – IEEE. 2019: 11–14. ISBN978-1-7281-3561-8.

АВТОРЫ

- Кугейко Михаил Михайлович**, e-mail: kugeiko@bsu.by, д. ф.-м. наук, проф. кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники, ф-т радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.
ORCID: 0000-0002-9462-9533
- Козлов Владимир Леонидович**, e-mail: kozlovVL@bsu.by, д.т.н., проф. кафедры информатики и компьютерных систем, ф-т радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.
ORCID: 0000-0003-3309-7470
- Фираго Владимир Александрович**, e-mail: Firago@bsu.by, доц. кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета, к.ф.–м.н., доц., Минск, Республика Беларусь.
ORCID: 0000-0001-8797-2125
- Згировская Наталья Владимировна**, e-mail: sgirowskaya@bsu.by, м.н.с. кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь.
ORCID: 0000-0002-0174-4437

- ing of atmospheric aerosol under conditions of information uncertainty. *Atmospheric and Ocean Optics*. 2016: 29 (5); 404–413.
18. **Kozlov V. L., Kugeiko M. M.** Measuring and diagnostic systems based on two-wave semiconductor lasers. – Minsk: BSU. 2010: 176.
 19. **Kozlov V. L., Rubis A. S., Lappo E. A., Vasilchuk A. S.** The use of correlation processing of digital images to optimize the process of measuring parameters and the depth of traces of rifling bullets. *Forensic expertise*. 2015: 1; 31–38.
 20. **Kozlov V. L., Vasilchuk A. S.** Rangefinder based on a 3D digital camera for forensic research. *Sensors and systems*. 2015: 9; 70–76.
 21. **Kozlov V., Wojcik W., Zgirovskaya N.** About Improving the Measuring Distances Accuracy Based on Correlation Analysis of Stereo Images. *Proc. of XIth ISPC Electronics and Information Technologies (ELIT)*. – IEEE. 2019: 11–14. ISBN978-1-7281-3561-8.

ABOUT AUTHORS

- Kugeiko Mikhail Mikhailovich**, e-mail: kugeiko@bsu.by, Doctor of Phys.-Math. Sci., Professor of the Department of Quantum Radiophysics and Optoelectronics, Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.
ORCID: 0000-0002-9462-9533
- Kozlov Vladimir Leonidovich**, e-mail: kozlovVL@bsu.by, Doctor of Tech. Sci., Professor of the Department of Informatics and Computer Systems, Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.
ORCID: 0000-0003-3309-7470
- Firago Vladimir Aleksandrovich**, e-mail: Firago@bsu.by, Associate Professor of the Department of Quantum Radiophysics and Optoelectronics of the Belarusian State University, Ph. D. Sci., Associate Professor, Minsk, Republic of Belarus.
ORCID: 0000-0001-8797-2125
- Zgirovskaya Natalya Vladimirovna**, e-mail: sgirowskaya@bsu.by, Junior Researcher, Department of Quantum Radiophysics and Optoelectronics, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.
ORCID: 0000-0002-0174-4437



Металлообработка. Сварка – Урал

16–19 марта 2021
Екатеринбург

международная выставка технологий,
оборудования, материалов для машиностроения,
металлообрабатывающей промышленности
и сварочного производства

крупнейший
специализированный
региональный проект в России



ВЫСТАВОЧНОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

ПЕРМСКАЯ
ЯРМАРКА

(342) 264-64-27
egorova@expoperm.ru
www.metal-ekb.expoperm.ru

