Применение волоконно-оптических технологий для верификации эксплуатационных параметров метеорологических лидаров

А. А. Ким¹, В. С. Лугиня¹, М. А. Коняев¹, А. Е. Орлов²,
Д. Н. Васильев²

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

² АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург, Россия

Метеорологические лидары в настоящее время являются одними из наиболее универсальных и информативных средств бесконтактного исследования атмосферы. В зависимости от типа они способны предоставлять информацию о высотности нижней границы облачности, количестве и плотности облачных слоев, динамических параметрах атмосферы (скорость и направление ветра, сдвиг ветра, вихревые следы и т. д.). Несмотря на растущий спрос и широкий спектр применений метеолидаров, на сегодняшний день не существует достаточно универсального и практичного метода верификации их эксплуатационных параметров. В статье описывается перспективный метод оценки эксплуатационных параметров метеолидаров, основанный на применении волоконно-оптических технологий.

Ключевые слова: метеорологический лидар, верификация параметров, способ поверки, оптоволоконная линия задержки, имитационная линия

Статья получена: 28.01.2020
Принята к публикации: 10.02.2020

Use of Fiber Optic Technologies to Verify the Operational Parameters of Meteorological Lidars

A. A. Kim¹, V. S. Luginya¹, M. A. Konyaev¹, A. E. Orlov²,
D. N. Vasiliev²

¹ Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinova, St. Petersburg, Russia

² Laser systems JSC, St. Petersburg, Russia

Meteorological lidars are currently one of the most universal and informative devices for non-contact atmospheric research. Depending on the type, they are able to provide information on the altitude of the lower cloud cover, the number and density of cloud layers, the atmospheric dynamic parameters (wind speed and direction, wind shear, vortex traces, etc.). Despite the growing demand and a wide application range of meteorological lidars, today there is no sufficiently universal and practical method for verifying their operational parameters. The article describes a promising method for verification the operational parameters of meteorological lidars based on the use of fiber-optic technologies.

Keywords: meteorological lidar, characteristics verification, verification method, fiber optic delay line, imitation line

Received: 28.01.2020

Accepted: 10.02.2020

Meteo lidar (LIDAR – Light Detection And Ranging) is an atmospheric backscattering profiler. An optical probe pulse is emitted into the atmosphere, after which an optical signal is detected backscattered from each point of the atmospheric path at the lidar photo-detector. The electrical signal from the photodetector undergoes analog-to-digital conversion with subsequent high-level processing. Coherent Doppler lidars are also capable of measuring the projection of the air mass velocity on the sounding axis by detecting the Doppler shift of the radiation frequency during heterodyne reception [1–3].

Метеолидар (LIDAR – Light Detection And Ranging) является профилометром обратного атмосферного рассеяния. Оптический зондирующий импульс излучается в атмосферу, после чего на фотоприемнике лидара происходит детектирование обратно рассеянного от каждой точки атмосферной трассы оптического сигнала. Электрический сигнал с фотоприемника подвергается аналого-цифровому преобразованию с последующей высокоуровневой обработкой. Когерентные доплеровские лидары также способны измерять и проекцию скорости движения воздушных масс на ось зондирования путем детектирования доплеровского смещения частоты излучения при гетеродинном приеме [1–3].

Сегодня лидары находят широкое применение в метеорологии, климатологии, экологии, ветроэнергетике и обеспечении безопасности полетов: они рекомендованы Международной организацией гражданской авиации (ICAO) к включению в состав измерительно-информационных систем аэропортового оснащения [4–6]. Одним из важных нюансов метрологического обеспечения метеолидаров являются трудности подтверждения соответствия их эксплуатационных характеристик, связанные с невозможностью создания эталонной атмосферной трассы и отсутствием сопоставимых эталонных измерителей.

Компания АО «Лазерные системы» (Санкт-Петербург, Россия), являющаяся ведущим отечественным производителем метеорологических лидаров, также активно работает над созданием современных средств их метрологического обеспечения. Существенных результатов в области метрологического обеспечения удалось достичь благодаря применению волоконно-оптических технологий для имитации некоторых метрологически значимых параметров атмосферы.

Основные эксплуатационные характеристики метеолидаров, в зависимости от их типа, можно условно классифицировать на первичные параметры и параметры по целевому назначению (см. табл.).

Today, lidars are widely used in meteorology, climatology, ecology, wind energy and flight safety: they are recommended by the International Civil Aviation Organization (ICAO) for inclusion in the measurement and information systems of airport equipment [4–6]. One of the important nuances of the metrological support of meteorological lidars is the difficulty of their operational characteristics verification associated with the inability to create a reference atmospheric path and the lack of comparable reference meters.

The company Laser Systems JSC (St. Petersburg, Russia), which is a leading domestic developer of meteorological lidars, is also actively working on creating modern facilities of their metrological support. Significant results in the field of metrological support were achieved thanks to the use of fiber-optic technologies to simulate some metrologically significant atmospheric parameters.

The main operational characteristics of meteorological lidars, depending on their type, can be conditionally classified into primary parameters and parameters according to their intended purpose (see table).

Таблица. Классификация эксплуатационных характеристик метеолидаров
Table. Classification of operational characteristics of meteorological lidars

Тип метеолидара Type of meteorological lidar	Первичные параметры Primary parameters	Параметры по целевому назначению Purpose-wise options
Измеритель нижней границы облачности Lower cloud cover meter	<ul style="list-style-type: none"> • дальность измерений; • пространственное разрешение; • величина слепой зоны; 	<ul style="list-style-type: none"> • расстояние до нижней границы облачности • distance to the lower cloud cover
Облакомер Cloud-range meter	<ul style="list-style-type: none"> • точность измерения дистанции. • range of measurements; 	<ul style="list-style-type: none"> • высотность и количество регистрируемых облачных слоев • altitude and number of registered cloud layers
Профилометр обратного рассеяния Backscatter profilometer	<ul style="list-style-type: none"> • spatial resolution; • size of the blind zone; • accuracy of distance measurement. 	<ul style="list-style-type: none"> • количество регистрируемых облачных слоев; • плотность атмосферы (профиль обратного рассеяния) • number of registered cloud layers; • atmospheric density (backscattering profile)
Доплеровский ветровой лидар Doppler wind lidar		<ul style="list-style-type: none"> • диапазон измеряемых скоростей ветра; • точность определения скорости; • измерение положительных и отрицательных скоростей • range of measured wind speeds; • speed accuracy; • measurement of positive and negative speeds

Из классификации видно, что для метеолидаров всех основных типов первичные параметры являются исключительно пространственно-временными, в то время как параметры по целевому назначению оказываются более сложными.

ВЕРИФИКАЦИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИДАРА

Для верификации первичных параметров лидара было предложено создать оптическую трассу, позволяющую имитировать объекты, удаленные от лидара на известные дистанции. Первый объект находится на границе слепой зоны лидара, второй – удален от него на величину пространственного разрешения, все последующие – удалены от лидара на известные расстояния (рис. 1).

Реализовать такую оптическую трассу удалось с помощью оптоволоконной линии задержки кольцевой структуры, содержащей линейные и ответвляющие элементы с подобранными коэффициентами деления. Иллюстрация принципа работы представлена на рис. 2 [7].

Оптический импульс зондирующего излучения лидара вводится в оптоволоконную линию и поступает на одну или несколько катушек, соединенных кольцом. При этом часть оптической мощности импульса отводится из линии при каждом прохождении оптической длины катушки через разветвитель. На выходе формируется последовательность угасающих импульсов, задержанных по времени относительно друг друга. Поскольку все длины оптических волокон постоянны и известны с высокой точностью, можно утверждать, что все временные промежутки между световыми импульсами на выходе из линии также известны и эквивалентны соответствующим дистанциям до имитируемых условных объектов.

Расстояние до условной n -ой отметки r_n однозначно определяется простым соотношением:

$$r_n = \frac{2l_n}{n_{ef}}, \quad (1)$$

где l_n – общая эквивалентная длина оптических волокон, n_{ef} – его эффективный показатель преломления. Строго говоря, $n_{ef} = f(\lambda)$ (где λ – длина волны лазера) и образует т.н. нелинейную дисперсионную зависимость, однако в данном случае при работе на одной длине волны излучения этим влиянием можно пренебречь.

Применение оптоволоконных технологий позволяет разместить все оптические элементы в достаточно компактном корпусе и делает воз-

From the classification it can be seen that for meteorological lidars of all basic types, the primary parameters are exclusively spatio-temporal, while the parameters for the intended purpose are more complex.

VERIFICATION OF THE PRIMARY PARAMETERS OF THE LIDAR

To verify the primary parameters of the lidar, it was proposed to create an optical path that allows imitating objects remote from the lidar at known distances. The first «object» is located on the border of the blind zone of the lidar, the second is removed from it by the amount of spatial resolution, all subsequent imitated objects are removed from the lidar by known distances (Fig. 1).

It was possible to realize such an optical path using a fiber optic delay line of a ring structure containing

Рис. 1. Расположение имитируемых объектов для верификации пространственно-временных параметров метеолидара

Fig. 1. Location of simulated objects for verification of the spatio-temporal parameters of the meteorological lidar

возможным проведение испытаний для оценки метрологических характеристик лидаров в полевых условиях без снятия лидара с места эксплуатации (рис. 3).

Типичный сигнал лидара при подключении такой имитационной линии содержит набор характерных пиков, эквивалентных отражению от мнимых объектов, удаленных друг от друга

linear elements and splitters with selected splitting ratio. An illustration of the principle of operation is shown in Fig. 2 [7].

The optical pulse of the probe lidar radiation is injected into the fiber optic line and supplied to one or more coils connected by a ring. In this case, part of the optical power of the pulse is diverted from the line at each passage of the optical length of the coil through the splitter. At the output, a sequence of fading pulses is formed, delayed in time relative to each other. Since all the lengths of the optical fibers are constant and known with high accuracy, it can be argued that all the time intervals between the light pulses at the exit from the line are also known and equivalent to the corresponding distances to the imitated conditional objects.

The distance to the conditional n -th mark r_n is uniquely determined by a simple relation:

$$r_n = \frac{2l_n}{n_{ef}}, \quad (1)$$

where l_n is the total equivalent length of the optical fibers, n_{ef} is its effective refractive index. Strictly speaking, $n_{ef} = f(\lambda)$ and forms the so-called nonlinear dispersion dependence, however, in this case, when working at the same radiation wavelength, this influence can be neglected.

Рис. 3. Лидар в полевых условиях: а) сборка имитационной линии в ударопрочном корпусе; б) лидар с подключенной имитационной линией

Fig. 3. Lidar in the field: a) imitation line assembly in a shockproof housing; b) lidar with connected imitation line

Рис. 4. Сигналы лидара: а) во всем диапазоне измерений; б) в ближней зоне
Fig. 4. Lidar signals: a) over the entire measurement range; b) in the near zone

и от лидара на точно известные расстояния во всей области измерений (рис. 4а) и в ближней зоне (рис. 4б). Анализ графиков позволяет говорить о соответствии первичных (пространственно-временных) параметров лидара заявляемым, в частности: дальности и точности измерения дистанций, пространственном разрешении и величине слепой зоны.

Процесс верификации пространственно-временных характеристик импульсного доплеровского ветрового лидара, работающего в режиме профилометра обратного рассеяния, происходит аналогичным образом. Зондирующее излучение через ломающее зеркало вводится в приемный коллиматор и направляется в имитационную линию (рис. 5).

На рис. 6. представлены графики пространственного профиля коэффициента обратного рассеяния β и SNR сигнала при подключении имитационной линии.

Рис. 5. Ввод зондирующего излучения и процесс верификации доплеровского лидара с помощью имитационной линии
Fig. 5. Insertion of the sensing emission and the Doppler lidar verification process using the imitation line

На графике также отчетливо видны эквидистантные пики. Расчётное расстояние между ними составляет 1000 м и определяется эквивалентной длиной оптического волокна имитационной линии.

Применение кварцевого оптического волокна в качестве среды распространения зондирующего излучения лидара оправдано практически во всех случаях, когда длина волны излучения превышает 850 нм, т.е. для большинства метеолидаров. Это связано с распространённостью оптоволоконной компонентной базы и с тем, что коэффициент ослабления в этом диапазоне длин волн позволяет создавать имитационные линии достаточно большой суммарной протяженности; использование полимерных волокон можно считать нецелесообразным по причине чрезмерно высокого коэффициента ослабления [8].

Разработанный стенд метрологического обеспечения метеорологических лидаров утвержден в качестве рабочего эталона единицы длины в диапазоне значений от 10 до 12000 м (номер в Реестре утвержденных эталонов единиц величин Росстандарта 3.6.БНЛ.0001.2017).

ПРИБЛИЖЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ ЛИНИИ К РЕАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЕ

Распространение зондирующего излучения и энергия сигнала на фотоприемнике лидара описывается т.н. лидарным уравнением в приближении однократного рассеяния [9]:

$$P(r) = \eta_{all} \eta_g(r) P_0 \left[\frac{c\tau}{2} \right] \frac{D}{r^2} \beta(r) \exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r) dr \right] + P_{bg}, \quad (2)$$

где P_0 – пиковая мощность импульса лазера, r – дальность, с которой принимается сигнал, η_{all} – общая эффективность лидарной системы, c – скорость света, τ – длительность лазерного импульса, $\eta_g(r)$ – геометрический фактор (зависит от геометрии оптической системы лидара, максимальное значение равно – 1), D – площадь приемной антенны, $\beta(r)$ – аэрозольный коэффициент обратного рассеяния, $\alpha(r)$ – аэрозольный коэффициент

Рис. 6. Пространственный профиль сигнала импульсного доплеровского лидара в режиме расчета β и SNR

Fig. 6. Spatial signal profile of the pulsed Doppler lidar in β and SNR measuring mode

The use of fiber-optic technologies makes it possible to place all optical elements in a rather compact package and to verificate the metrological characteristics of lidars in the field without removing the lidar from the operating site (Fig. 3).

A typical lidar signal when connecting such a imitation line contains a set of specific peaks equivalent to reflection from imaginary objects that are remote from each other and from the lidar at precisely known distances in the entire measurement range (Fig. 4 a) and in the near zone (Fig. 4b). The analysis of the graphs allows us to talk about the correspondence of the primary (spatio-temporal) parameters of the lidar with the declared ones in particular: range and accuracy of distance measurement, spatial resolution and the size of the blind zone.

The verification of the spatio-temporal parameters of a pulsed Doppler wind lidar operating in the backscattering profiler mode goes in a similar way. The probe radiation through the breaking mirror is inserted into the receiving collimator and sent to the imitation line (Fig. 5).

In Fig. 6, the plots of the spatial profile of the backscattering coefficient β and SNR signal are presented when an imitation line is connected to the lidar. Equidistant peaks are also clearly visible on the graph.

ослабления, P_{bg} – мощность фонового сигнала. С другой стороны, выражение, в общем виде описывающее энергетические характеристики сигналов, формируемых на выходе имитационной оптоволоконной линии, имеет следующий вид:

$$P(l) = BX_n \alpha_n \left(\prod_{n=1}^n (1 - \alpha_{n-1}) \right) \exp \left[-\alpha_f \sum_{n=1}^n l_n \right], \quad (3)$$

где B – аппаратная константа, характеризующая эффективность ввода-вывода излучения, α_f – коэффициент ослабления света в волокне, l_n – длина n -го оптоволоконного участка, α_n – коэффициент деления n -го оптического разветвителя, X_n – коэффициент дополнительной аттенюации n -го выходного оптического импульса.

$$A \frac{\beta}{\left(\sum_{n=1}^n r_n \right)^2} \exp \left[-2 \left(\alpha \cdot \sum_{n=0}^n r_n \right) \right] = BX_n \alpha_n \left(\prod_{n=1}^n (1 - \alpha_{n-1}) \right) \times \exp \left[-\alpha_f \sum_{n=1}^n l_n \right]. \quad (4)$$

Левая часть уравнения (4) является видоизмененным лидарным уравнением с обобщенным аппаратным коэффициентом A , записанным для дискретных расстояний r_n и изотропной атмосферы с постоянными коэффициентами β и α ; правая часть описывает энергетику сигналов, формируемых на выходе имитационной оптоволоконной линии.

Детальное рассмотрение уравнения (4) показывает, что при заданных и постоянных β и α оно может иметь решения во всем диапазоне расстояний r_n только в случаях, если: а) имитационная линия имеет последовательную структуру (рис. 7) с подбором независимой аттенюации и коэффициентов деления ответвляющих элементов в каждом из выходных плеч; б) при внедрении механиз-

The estimated distance between them is 1000 m and is determined by the equivalent length of the optical fiber imitation line.

The use of quartz optical fiber as a medium for the propagation of probe lidar radiation is justified in almost all cases when the radiation wavelength exceeds 850 nm, i. e. for most meteorological lidars. This is due to the prevalence of the optical fiber component base and the fact that the attenuation coefficient in this wavelength range allows you to create imitation lines of a sufficiently large total length; the use of polymer fibers can be considered impractical due to the excessively high attenuation coefficient [8].

The developed stand for metrological support of meteorological lidars was certified as a measuring standard for a unit of length in the range of values from 10 to 12000 m (the number in the Register of approved standards for units of Rosstandart 3.6.BNL.0001.2017).

IMITATION LINE APPROACHING THE REAL ATMOSPHERE

The propagation of probe radiation and the signal energy at the lidar photodetector is described by the so-called lidar equation in the single scattering approximation (2) [9].

$$P(r) = \eta_{all} \eta_g(r) P_0 \left[\frac{c\tau}{2} \right] \frac{D}{r^2} \beta(r) \exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r) dr \right] + P_{bg}, \quad (2)$$

where P_0 – is the peak power of the laser pulse, r – is the distance with which the signal is received, η_{all} – is the overall efficiency of the lidar system, c – is the speed of light, τ – is the duration of the laser pulse, $\eta_g(r)$ – is the geometric factor (depends on geometry of the lidar optical system, the maximum value is 1), D – is the area of the receiving antenna, $\beta(r)$ – is the aerosol backscattering coefficient, $\alpha(r)$ – is the aerosol attenuation coefficient, and P_{bg} – is the power of the

Рис. 7. Имитационная линия последовательной структуры
Fig. 7. Imitation line with sequential structure

мов активной регуляции оптической мощности в структурах петлевого типа (см. рис. 2).

На рис. 7 изображены: приемный коллиматор (1), приемопередающий блок (2), дуплексный оптический шнур калиброванной длины (3), оптоволоконные разветвители (4), линия задержки слепой зоны (5), линия задержки пространственного разрешения (6), линии задержки высотных отсчетов (n штук) (7), перестраиваемые аттенюаторы (8), оптоволоконный сплиттер (9), передающий коллиматор (10).

Последовательная структура имитационной линии при реализации протяженных оптических трасс с большим количеством ответвлений оказывается чрезмерно громоздкой и экономически нецелесообразной, а пассивные методы регуляции ее параметров существенно ограничивают область применения. Гораздо более перспективным направлением является внедрение механизмов активной регуляции оптической мощности и обратных связей в структурах петлевого типа. В их отсутствии удастся добиться удовлетворительных показателей лишь в ближней или дальней зоне (рис. 8).

На рис. 8 лидарным уравнением моделируются три изотропные атмосферы с коэффициентами обратного рассеяния $\beta=10^{-3}$; $4 \cdot 10^{-3}$; 10^{-4} и коэффициентом ослабления $\alpha=4 \cdot 10^{-5}$. Величины этих коэффициентов можно считать свойственными реальной атмосфере для длины волны излучения

background signal. On the other hand, an expression that generally describes the energy characteristics of

For us, optical fiber is as pure as nature.

WE LOVE PURE RESULTS
Fishing but also the fiber draw process require concentration, time and reflection. The purity of nature as well as high quality telecom fiber technology are found here in Finland. Latest improvements result in 3000 m/min - speed and precision for your success.

rosendahlnextrom.com

KINIL GROUPS

MADE IN EUROPE

1,55 мкм. Из графиков видно, что пассивными методами регуляции удается добиться удовлетворительного соответствия профилей либо в ближней, либо в дальней зоне. При активной регуляции динамический диапазон перестройки аттенюации в данном случае составит порядка 30 дБ.

ПЕРСПЕКТИВЫ И НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ

Для приближения имитационной линии к параметрам естественной атмосферы целесообразно обеспечить контролируемое временное уширение и амплитудное профилирование зондирующего импульса в оптоволоконной линии для имитации отражения от распределенных атмосферных образований (облаков, туманов), а также контролируемое относительно малое частотное смещение зондирующего излучения для верификации параметров доплеровских ветровых лидаров. Оба этих аспекта могут быть реализованы с применением оптоволоконных технологий. Так, например, временное уширение зондирующего импульса легко обеспечивается параллельным массивом согласованных линий задержки, дискретность которых равна его длительности. Амплитудное профилирование достигается включением в линию оптоволоконного амплитудного модулятора с внешним электрическим управлением. Контролируемое смещение частоты излучения может быть обеспечено применением акустооптических модуляторов или оптоволоконных электрооптических фазовых модуляторов, работающих в режиме линейной модуляции фазы [10, 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение оптоволоконных технологий и элементной базы сегодня является одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы оценки и подтверждения соответствия эксплуатационных параметров метеорологических лидаров. В условиях отсутствия сопоставимых эталонных измерителей и невозможности создания эталонной атмосферной трассы оптоволоконные имитационные линии являются едва ли не единственным практичным и универсальным средством верификации характеристик метеолidarов.

Функциональные возможности оптоволоконной линии не ограничиваются только созданием известных временных задержек. Они способны обеспечить также временное уширение и профилирование зондирующих импульсов, частотное смещение излучения и др. Фактически это приводит к тому, что на данный момент становится воз-

signals generated at the output of an imitation fiber optic line has the following form:

$$P(l) = BX_n \alpha_n \left(\prod_{n=1}^n (1 - \alpha_{n-1}) \right) \exp \left[-\alpha_f \sum_{n=1}^n l_n \right], \quad (3)$$

where B – is the constant characterizing the radiation input-output efficiency, α_f is the light attenuation coefficient in the fiber, l_n – is the length of the n -th fiber section, α_n is the division coefficient of the n -th optical splitter, X_n is the additional attenuation coefficient of the n -th output optical momentum.

$$A \frac{\beta}{\left(\sum_{n=1}^n r_n \right)^2} \exp \left[-2 \left(\alpha \cdot \sum_{n=0}^n r_n \right) \right] = BX_n \alpha_n \left(\prod_{n=1}^n (1 - \alpha_{n-1}) \right) \times \exp \left[-\alpha_f \sum_{n=1}^n l_n \right]. \quad (4)$$

The left side of equation (4) is a modified lidar equation with a generalized hardware coefficient A written for discrete distances r_n and an isotropic atmosphere with constant coefficients β and α ; the right part describes the energy of signals generated at the output of the imitation fiber optic line.

A detailed consideration of equation (4) shows that for given and constant β and α , it can have solutions over the entire range of distances r_n only if: a) the imitation line has a sequential structure (Fig. 7) with the selection of independent attenuation and division ratio of splitters in each of the output arms; b) when introducing mechanisms of active regulation of optical power in loop-type structures (see Fig. 2).

The Fig. 7 shows: a receiving collimator (1), a transceiving unit (2), a calibrated-length duplex optical cord (3), fiber optic couplers (4), a blind zone delay line (5), a spatial resolution delay line (6), high-rise delay lines samples (n pieces) (7), tunable attenuators (8), fiber optic splitter (9), transmitting collimator (10).

The sequential structure of the imitation line when implementing long optical paths with a large number of splitters is excessively cumbersome and economically impractical, and passive methods of regulating its parameters significantly limit the scope. A much more promising way is the introduction of mechanisms for active regulation of optical power and feedback in loop-type structures. In their absence, it is possible to achieve satisfactory indicators only in the near or far zone (Fig. 8).

In fig. 8, the lidar equation simulates 3 isotropic atmospheres with backscattering coefficients $\beta = 10^{-3}$; $4 \cdot 10^{-3}$; 10^{-4} and attenuation coefficient $\alpha = 4 \cdot 10^{-5}$. The values of these coefficients can be considered characteristic

можным создание имитации атмосферной трассы, обладающей эталонными свойствами и изменяемыми в широких пределах параметрами.

Разработанный АО «Лазерные системы» передвижной стенд для контроля параметров метеодатчиков зарегистрирован в качестве рабочего эталона и используется для проведения первичных и регламентных поверок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев М., Васильев Д., Пенкин М., Смоленцев С., Бореjšо А., Ключков Д., Коняев М., Орлов А., Чугреев А. Когерентные доплеровские лидары для мониторинга ветровой обстановки. *Фотоника*. 2014; 6(48): 20–29.
2. Бореjšо А.С., Ким А.А., Коняев М.А., Лугиня В.С., Морозов А.В., Орлов А.Е. Современные лидарные средства дистанционного зондирования атмосферы. *Фотоника*. 2019; 13(7): 648–657. DOI: 10.22184/1993-7296.FROS.2019.13.7.648.657.
3. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. *Лазерное гетеродинамирование* / Под ред. Н.Д. Устинова. – М.: Наука, 1985.
4. Regional implementation of Electronic Terrain and Obstacle data (e-TOD). – International Civil Aviation Organization SAM / IG / 13; South American Regional Office: procs. of the Thirteenth Workshop / Meeting of the SAM Implementation Group (SAM / IG / 13) – Regional Project RLA / 06 / 901, Lima, Peru, April 21–25, 2014.
5. Руководство по планированию и обслуживанию воздушного движения: документ ИКАО: ДОС9426-AN / 924. – Международная организация гражданской авиации. 1984. Ч. 2, гл. 3, дополнение А. 636 с.
6. Аэродромные системы дистанционного обнаружения маловысотного сдвига ветра: документ ИКАО: Дос А39-WP / 287. – Международная организация гражданской авиации. 2016, март 25.
7. Патент РФ № 2636797. Способ контроля и поверки метрологического лидарного оборудования типа облакомер и устройство для его осуществления. МПК G01S7 / 497, G01C25 / 00 приоритет от 01 / 19 / 2017 / Ким А.А., Ключков Д.В.
8. Бореjšо А.С., Ким А.А., Страхов С.Ю. Ограничения в применении волоконно-оптических технологий для дистанционной передачи энергии. *Радиопромышленность*. 2017; 4: 34–41. DOI:10.21778 / 2413-9599-2017-4-34-41.
9. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Пер. с англ. И. Г. Городецкого; под ред. А. Б. Карасева. – М.: Мир. 1987. 550 с.
10. De Paula R. P., Moore E. L. Review of all-fiber phase and polarization modulators. *Fiber Optic and Laser Sensors II*: proc. SPIE of 1984. Technical Symposium East. USA. 1984; 478: 3–11. DOI:10.1117 / 12.942649.
11. Jenoptik. Integrated-optical modulators. Technical information and instructions for use Updated: 12.08.2019 [Electronic resource]: Available at: https://www.jenoptik.us//media/websitedocuments/optics/modulators/modulatorfibel_en.pdf.

ОБ АВТОРАХ

Ким Алексей Андреевич, к. т. н., БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург. alexeykim90@gmail.com.

Лугиня Виктория Сергеевна, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург. luginya@lsystems.ru.

Коняев Максим Анатольевич, д. т. н., БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург. konyaev@lsystems.ru.

Орлов Андрей Евгеньевич, к. т. н., АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург. orlov@lsystems.ru

Васильев Дмитрий Николаевич, к. т. н., АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург. vasiliev@lsystems.ru.

of the real atmosphere for a radiation wavelength of 1.55 μm . It can be seen from the graphs that passive methods of regulation make it possible to achieve a satisfactory correspondence between the profiles in the near or in the far zone. With active regulation, the dynamic range of attenuation tuning in this case will be about 30 dB.

PROSPECTS AND DIRECTION OF DEVELOPMENT

To approximate the imitation line to the parameters of the natural atmosphere, it is advisable to provide controlled temporal broadening and amplitude profiling of the probe pulse in the fiber optic line to simulate reflection from distributed atmospheric formations (clouds, fogs), as well as a controlled relatively small frequency shift of the probe radiation to verify the parameters of the Doppler wind lidars. Both of these aspects can be implemented using fiber optic technology. So, for example, the temporal broadening of the probe pulse is easily provided by a parallel array of matched delay lines, the discreteness of which is equal to its duration. Amplitude profiling is achieved by including an external fiber optic amplitude modulator into the line. A controlled shift of the radiation frequency can be achieved by using acousto-optical modulators or fiber electro-optical phase modulators operating in the linear phase modulation mode [10, 11].

CONCLUSION

The use of fiber-optic technologies and element base today is one of the most promising directions for solving the problem of meteorological lidars parameters verification. In the absence of comparable reference meters and the impossibility of creating a reference atmospheric path, fiber-optic imitation lines are almost the only practical and universal facilities of verifying the characteristics of meteorological lidars.

The functionality of the fiber optic line is not limited to the creation of known time delays. They can also provide temporary broadening and profiling of probe pulses, frequency shift of radiation, etc. Actually, this leads to the fact that at the moment it becomes possible to create an imitation of the atmospheric path with standard properties and parameters that can be changed widely.

A verification kit developed by Laser Systems JSC for monitoring the parameters of meteorological lidars is certified as a metrology standard and is used for initial and routine verification procedures.

REFERENCES

1. Andreev M., Vasil'ev D., Penkin M., Smolencev S., Borejšo A., Klochkov D., Konyaev M., Orlov A., Chugreev A. Kogerentnye dopplerovskie lidary dlya

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива. Метеорологические лидары – принципы действия, разработка: Коняев М. А., Орлов А. Е.; Имитационная оптоволоконная линия – идея, разработка, математическая модель: Ким А. А.; Эксперименты: Ким А. А., Орлов А. Е.; Метрологическое обеспечение, аттестация и сертификация: Лугиня В. С., Васильев Д. Н.

Разработка и исследования выполнена за счет собственных средств АО «Лазерные системы».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Новости Высшей аттестационной комиссии

На сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents>) обновлена информация «Рецензируемые научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования (по состоянию на 28.02.2020 года)». В соответствии с этой информацией подтверждено включение журнала ФОТОНИКА в международную систему цитирования (базу данных) CA(pt) – п. 961 [<https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=19&name=3408291001&f=5950>].

Обновлена информация «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (по состоянию на 28.02.2020 года)». В соответствии с ней подтверждены научные специальности и соответствующие им отрасли науки, по которым присуждаются ученые степени по результатам работ, опубликованных в журнале ФОТОНИКА: 01.04.05 – Оптика (технические науки), 01.04.05 – Оптика (физико-математические науки), 01.04.07 – Физика конденсированного состояния (технические науки), 01.04.07 – Физика конденсированного состояния (физико-математические науки), 01.04.21 – Лазерная физика (технические науки), 05.11.03 – Приборы навигации (технические науки), 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки), 05.11.14 – Технология приборостроения (технические науки), 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки).

monitoringa vetrovoj obstanovki. *Photonics Russia*. 2014; 6(48): 20–29.

2. Boreysho A. S., Kim A. A., Konyaev M. A., Luginya V. S., Morozov A. V., Orlov A. E. Modern Lidar Systems for Atmosphere Remote Sensing. *Photonics Russia*. 2019; 13(7): 648–657. DOI: 10.22184/1993-7296.FROS.2019.13.7.648.657.
3. Protopopov V. V., Ustinov N. D. *Laser heterodyning* / ed. by Ustinov N. D. – M.: Nauka, 1985.
4. Regional implementation of Electronic Terrain and Obstacle data (e-TOD). – International Civil Aviation Organization SAM / IG / 13; South American Regional Office: procs. of the Thirteenth Workshop / Meeting of the SAM Implementation Group (SAM / IG / 13) – Regional Project RLA / 06 / 901, Lima, Peru, April 21–25, 2014.
5. Air traffic planning and maintenance guidance: ICAO document: DOC9426-AN / 924. – International Civil Aviation Organization. 1984. Part 2, Ch. 3, appendix A. 636 c.
6. Low Altitude Wind Shear Remote Detection Aerodrome Systems: ICAO Document: Doc A39-WP / 287. – International Civil Aviation Organization. 2016, March 25.
7. Patent RU № 2636797. Method for monitoring and verification of Meteorological Lidar Ceilometers-Type Equipment and the Device for its Implementation. IPC G01S7 / 497, G01C25 / 00 priority of 01 / 19 / 2017 / Kim A. A., Klochkov D. V.
8. Boreysho A. S., Kim A. A., Strakhov S. Yu. Limitations in the application of fiber-optic technologies for remote transmission of energy. *Radio industry Russian*. 2017; 4: 34–41. DOI:10.21778 / 2413-9599-2017-4-34-41.
9. Mezheris R. *Laser remote sensing* / Translation from English I. G. Gorodetsky; under the editorship of A. B. Karaseva. – M.: Mir. 1987. 550 p.
10. De Paula R. P., Moore E. L. Review of all-fiber phase and polarization modulators. *Fiber Optic and Laser Sensors II*: proc. SPIE of 1984. Technical Symposium East. USA. 1984; 478: 3–11. DOI:10.1117 / 12.942649.
11. Jenoptik. Integrated-optical modulators. Technical information and instructions for use Updated: 12.08.2019 [Electronic resource]: Available at: https://www.jenoptik.us//media/websitedocuments/optics/modulators/modulatorfibel_en.pdf.

ABOUT AUTHORS

Kim A., Ph.D, BSTU «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, St. Petersburg.
ORCID: 0000-0002-8923-2953

V. Luginya, BSTU «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, St. Petersburg.
ORCID: 0000-0003-3159-5193

M. Konyaev, Ph.D, BSTU «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, St. Petersburg.
ORCID: 0000-0001-8884-0861

A. Orlov, Ph.D, Laser Systems JSC, St. Petersburg.
ORCID: 0000-0001-9515-8107

D. Vasiliev, Ph.D, Laser Systems JSC, St. Petersburg.
ORCID: 0000-0002-4033-2523

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors. Meteorological lidars – operating principles, development: Konyaev M. A., Orlov A. E.; Imitation fiber optic line – concept, development, mathematical model: Kim A. A.; Experiments: Kim A. A., Orlov A. E.; Metrological support, certification: Luginya V. S., Vasiliev D. N.

Development and research are carried out at the expense of Laser Systems JSC.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest.