



Перспективы оптико-радиочастотных систем дистанционного зондирования атмосферы

А. С. Бореjšо, М. А. Коняев, А. А. Ким, А. С. Михайленко
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург, Россия

Средства дистанционного зондирования атмосферы в оптическом и радиочастотном диапазонах находят широкое применение в аэронавигации, технологиях обеспечения безопасности полетов, метеорологии, экологии, климатологии и в иных сферах. Лидарные и радиолокационные системы имеют общие принципы функционирования. Несмотря на эту общность, их традиционно разделяют в зависимости от используемого частотного диапазона электромагнитного излучения. Следствием такого разделения становится разделение их функциональных возможностей и решаемых задач. Однако, как показывает практика, комплексное использование оптического и радиочастотного излучения при атмосферном мониторинге может привести к синергетическому эффекту и существенному расширению возможностей подобных системы. В статье рассматриваются возможности и перспективы совместного применения оптико-радиочастотных средств атмосферного зондирования.

Ключевые слова: мониторинг атмосферы, дистанционное зондирование, лидар, радиолокатор, оптико-радиочастотный локатор

Статья получена: 14.01.2021
Принята к публикации: 10.02.2021

Лидарные и радарные системы дистанционного зондирования атмосферы в основе своей работы опираются на один и тот же принцип: отражение или рассеяние электромагнитного излучения от атмосферных объектов

Prospects of Optical-Radio-Frequency Systems for the Atmosphere Remote Sensing

A. S. Boreysho, M. A. Konyaev, A. A. Kim, A. S. Michaylenko
BSTU "VOENMEH" named after D. F. Ustinov,
Laser Systems LLC, St. Petersburg, Russia

Means of the atmosphere remote sensing in the optical and radio frequency ranges are widely used in air navigation, flight safety technologies, meteorology, ecology, climatology and other areas. Lidar and radar systems have common principles of operation. Despite this common feature, they are traditionally divided according to the used electromagnetic radiation frequency ranges. The consequence of this separation is that their functionality and tasks are separated. However, as practice proves, the integrated use of optical and radio frequency radiation in atmosphere monitoring can lead to a synergistic effect and a significant expansion of the capabilities of such systems. The article discusses the possibilities and prospects for the joint application of optical-radio-frequency devices of atmosphere sensing.

Keywords: atmosphere monitoring, remote sensing, lidar, radar, optical-radio-frequency locator

Received on: 14.01.2021
Accepted on: 10.02.2021

Lidar and radar systems for the atmosphere remote sensing are based on the same principle: reflection or scattering of electromagnetic radiation from atmosphere objects and the subsequent determination of its characteristics. Nevertheless, historically and traditionally, there has been a separation of optical (lidar) and radio frequency sensing devices. This is largely due to the different methods of generating electromagnetic radiation in the optical and radio frequency ranges, the difference in the technique of receiving and processing signals.



и последующее определение его характеристик. Тем не менее исторически и традиционно сложилось разделение оптических (лидарных) и радиочастотных средств зондирования. Во многом это обусловлено различными методами генерации электромагнитного излучения в оптическом и радиочастотных диапазонах, различием техники приема и обработки сигналов.

Сегодня оптическое и радиочастотное зондирование атмосферы представляет собой сформировавшиеся независимые научно-технические направления с характерными областями применения. Тем не менее в ряде случаев их совместное использование оказывается оправданным и эффективным. Однако для того чтобы увидеть потенциальные преимущества комплексирования разнодиапазонных систем дистанционного зондирования, необходимо понимать специфику и ограничения каждой из них.

Современные лидарные средства заняли твердые позиции в области 3D-сканирования, навигации и сенсорики беспилотных транспортных средств и летательных аппаратов, экологического мониторинга атмосферы мегаполисов и промышленных объектов, ветровой энергетики, воздушной безопасности и научных исследований. Наибольшее распространение и значимость получили лидарные системы анализа атмосферы на предмет распределения аэрозольного и химического состава воздуха, а также скорости и направления ветра [1]. При лидарном зондировании атмосферы, например при построении профилей ветра или коэффициента обратного рассеяния (профиль облачности), полезный сигнал является результатом рассеяния лазерного излучения на мелкодисперсном атмосферном аэрозоле, который всегда присутствует в приземном слое. В этом случае детектируемая мощность рассеянного сигнала в зависимости от дистанции r определяется лидарным уравнением, которое связывает характеристики атмосферы и параметры лидарной системы:

$$P(r) = P_0 \eta \left(\frac{A}{r^2} \right) \left(\frac{c\tau}{2} \right) \beta(r) e^{-2 \int \alpha(r) dr},$$

где η – общая эффективность приемной системы, P_0 – выходная мощность источника, $\beta(r)$ – коэффициент обратного рассеяния атмосферы, c – скорость света, τ – длительность импульса, A – площадь приемной апертуры лидара, $\alpha(r)$ – коэффициент ослабления атмосферы.

Характеристики атмосферы заключены в коэффициентах $\beta(r)$ и $\alpha(r)$, характеризующих наличие и распределение аэрозоля по лучу зондирования.

Today, optical and radio frequency sensing of the atmosphere are independent scientific and technical areas with specific fields of application. Nevertheless, in some cases, their joint use turns out to be justified and effective. However, in order to see the potential benefits of integrating different-range remote sensing systems, it is necessary to understand the specifics and limitations of each of them.

Modern lidars have taken a solid position in the field of 3D scanning, navigation and sensorics of unmanned vehicles and aircraft, environmental monitoring of the atmosphere of megacities and industrial facilities, wind energy, air security and scientific research. The most widespread and significant are lidar systems for analyzing the atmosphere aerosol distribution and chemical air composition, as well as wind speed and direction [1]. In lidar sensing of the atmosphere, e.g., when constructing wind profiles or the backscatter coefficient (cloud profile), the useful signal is the result of laser radiation scattering by fine atmosphere aerosol, which is always present in the surface layer. In this case, the detected power of the scattered signal, depending on the distance r , is determined by the lidar equation, which relates the characteristics of the atmosphere and the parameters of the lidar system:

$$P(r) = P_0 \eta \left(\frac{A}{r^2} \right) \left(\frac{c\tau}{2} \right) \beta(r) e^{-2 \int \alpha(r) dr},$$

where η is the overall efficiency of the receiving system, P_0 is the output power of the lidar source, $\beta(r)$ is the atmosphere backscattering coefficient, c is the speed of light, τ is the pulse duration, A is the area of the receiving aperture of the lidar, $\alpha(r)$ is the atmosphere attenuation coefficient.

The characteristics of the atmosphere are contained in the coefficients $\beta(r)$ and $\alpha(r)$, which characterize the presence and distribution of aerosol along the sensing beam. In general, they can be associated with the values of meteorological visibility range (MVR). The value of attenuation α of the atmosphere can be calculated using the empirical formula:

$$\alpha = \left(\frac{3,91}{V} \right) \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^q,$$

$$\text{where } q = \left\{ \begin{array}{ll} 1.6 & \text{for } V > 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{for } 6 < V < 50 \text{ km} \\ 0.16V + 0.34 & \text{for } 1 < V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5 & \text{for } 0.5 < V < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{for } 0 < V < 0.5 \text{ km} \end{array} \right\},$$

where λ is the wavelength [μm], V is the MVR [km], and α [km^{-1}].



В общем случае их можно связать со значениями метеорологической дальности видимости (МДВ). Значение ослабления α атмосферы можно посчитать по эмпирической формуле:

$$\alpha = \left(\frac{3,91}{V} \right) \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^q,$$

$$\text{где } q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{для } V > 50 \text{ км} \\ 1,3 & \text{для } 6 < V < 50 \text{ км} \\ 0,16V + 0,34 & \text{для } 1 < V < 6 \text{ км} \\ V - 0,5 & \text{для } 0,5 < V < 1 \text{ км} \\ 0 & \text{для } 0 < V < 0,5 \text{ км} \end{array} \right\},$$

где λ – длина волны [мкм], V – МДВ [км], а α [км⁻¹].

Земная атмосфера оказывает существенное влияние на эффективность любого лидара: изменение метеорологических условий от ясного неба к плотной облачности или туману, дождю, метели или урагану ведет к существенному снижению дальности действия лидара вплоть до полной его неэффективности из-за сверхинтенсивного рассеяния и поглощения зондирующего излучения уже в ближней зоне. Иными словами, с понижением метеорологической дальности видимости падает и дальность эффективной работы атмосферного лидара. В таблице приведены типичные дальности работы доплеровского лидара ИВЛ-5000 [2] в зависимости от состояния атмосферы и значения МДВ. Снижение рабочей дальности лидара связано со значительным увеличением атмосферных потерь на рассеянии и ослаблении оптического излучения на крупном аэрозоле, который образует туман и характерен для осадков различного типа.

Длины волн радиочастотных систем зондирования атмосферы больше оптических на 3–4 порядка. Это обуславливает большую проникающую способность радиоизлучения в условиях плотных атмосферных образований, дождя и штормов, однако делает их практически бесполезными в чистой атмосфере, поскольку центры рассеяния – частицы мелкодисперсного аэрозоля и пыль – оказываются чрезвычайно малыми для эффективного рассеяния радиочастотного излучения. Иными словами, радиочастотные метеолокаторы наиболее эффективны в условиях неблагоприятных погодных условий при малой дальности видимости. В случае распределенной в некотором объеме цели принимаемая радаром мощность определяется следующим уравнением:

The Earth's atmosphere has a significant impact on the efficiency of any lidar: a change in meteorological conditions from clear skies to dense clouds or fog, rain, blizzard or hurricane leads to a significant decrease in the range of the lidar, up to its complete inefficiency due to superintense scattering and absorption of sounding radiation already in near zone. In other words, with a decrease in the meteorological visibility range, the effective range of the atmosphere lidar also decreases. The table shows typical ranges of operation of the IVL-5000 Doppler lidar [2], depending on the state of the atmosphere and the MVR value. A decrease in the lidar operating range is associated with a significant increase in atmosphere losses due to scattering and attenuation of optical radiation by a large aerosol, which forms a fog and is typical for various types of precipitation.

The wavelengths of radio-frequency systems for sensing the atmosphere are 3 to 4 orders longer than optical ones. This leads to a high penetrating ability of radio emission in conditions of dense atmosphere formations, rain and storms, but makes them practically useless in a clean atmosphere, since the scattering centers (particles of fine aerosol and dust) are extremely small for effective scattering of radio frequency radiation. In other words, radio frequency weather radars are most effective in adverse weather conditions with low visibility. In the case of a volume-distributed target, the power received by the radar is determined by the following equation:

$$Pr(r) = \frac{\pi^3 P_t G^2 \theta^2 c \tau |K|^2 Z}{2^{10} \ln(2) \lambda^2 r^2 L_{atm}^2 L_{MF}}.$$

where: P_t is the output power of the source, G is the antenna gain, θ is the angular field of the antenna, τ is the pulse duration, s is the speed of light, K is the coefficient taking into account the characteristics of precipitation, Z is the reflectivity, L_{atm} is the atmosphere attenuation to the target, L_{MF} is losses in the electronic processing channel.

The reflectivity of atmosphere precipitation during radar sensing is associated with the size distribution of scattering centers, the rate of precipitation and other factors, but in a first and fairly accurate approximation it can be expressed by the following relationship:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD,$$

where: D is the size of the scattering particle, $N(D)$ is the concentration of particles with size D in a unit volume.

Thus, it is possible to relate the characteristic values of the reflectivity of meteorological radars with the coef-



$$Pr(r) = \frac{\pi^3 P_t G^2 \theta^2 c \tau |K|^2 Z}{2^{10} \ln(2) \lambda^2 r^2 L_{atm} L_{MF}}$$

где: P_t – выходная мощность источника, G – усиление антенны, θ – угловое поле антенны, τ – длительность импульса, c – скорость света, K – коэффициент, учитывающий характеристики осадков, Z – отражаемость, L_{atm} – атмосферное ослабление до цели, L_{MF} – ослабление канала обработки.

Отражаемость атмосферных осадков при радарном зондировании связана с распределением по размерам рассеивающих центров, скорости выпадения осадков и других факторов, но в первом и достаточно точном приближении она может быть выражена следующей зависимостью:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD,$$

где: D – размер рассеивающей частицы, $N(D)$ – концентрация частиц с размером D в единичном объеме.

Таким образом, можно связать характерные значения отражаемости метеорологических радаров с коэффициентом обратного рассеяния и ослабления атмосферы для лидара, поскольку детектируемый сигнал в обоих случаях формируется рассеянием и отражением на частицах в атмосфере.

С учетом этих особенностей взаимодействия излучения с аэрозолем логичным выглядит совмещение двух измерительных систем на основе лидара оптического диапазона и радиодиапазона с одинаковым пространственным и временным разрешением, обеспечивающие всепогодность измерений. Работы в направлении совмещения оптико-радиочастотных средств зондирования атмосферы реализуются во многих странах [3, 4].

efficient of backscattering and attenuation of the atmosphere for the lidar, since the detected signal in both cases is formed by scattering and reflection on particles in the atmosphere.

Taking into account these features of the radiation interaction with aerosol, it seems logical to combine two measuring systems based on a lidar of the optical range and a radio range with the same spatial and temporal resolution, ensuring all-weather measurements. Work in the direction of combining optical-radio frequency devices of sensing the atmosphere is being implemented in many countries [3, 4]. In Russia, the combination of lidar and radar on a single mobile platform to ensure all-weather measurements was carried out by Laser Systems LLC [3].

As a result of the analysis of the dependence of the working distances on the meteorological reflectivity of the atmosphere [5], it was shown that the effective functioning of the classical X-band Doppler radar systems is possible under specific weather conditions, when the reflectivity of atmosphere objects is not lower than a certain value, which is critical for the optical range and sharply reduces the operating range. Therefore, when using two bands, optical and radio frequency, a weather “blind zone” appears. In it, the typical operating ranges of both systems are of the order of 2 kilometers or less. This turns out to be unacceptable for the meteorological complex of air navigation and flight safety under changing meteorological conditions in wide ranges. Furthermore, the natural blind zone for X-radar can be more than 3 kilometers.

Mathematical modeling shows that the addition of a millimeter-wave radar (Ka-band weather radar) closes this weather “blind zone” and makes it possible to ensure all-weather measurement of wind parameters with a minimum working distance of more than 5000

Таблица 1. Дальность работы лидара в зависимости от атмосферных условий

Table. Lidar operating range depending on atmosphere conditions

Состояние атмосферы State of the atmosphere	Метеорологическая дальность видимости (км) Meteorological visibility range, km	Типичная дальность измерения скорости ветра лидаром ИЛВ-5000, м Typical range for measuring wind speed with ILV-5000 lidar, m
Туман Fog: очень сильный very strong сильный strong заметный perceptible слабый weak	Up to 0,05 Менее 0,05 0,05–0,2 0,2–0,5 0,5–1	– <1 000 ~1 000 ~2 000
Дымка Haze: очень сильная very strong сильная strong заметная noticeable слабая weak	1–2 2–4 4–10 10–20	~2 500 ~3 500 ~5 000 >6 000
Хорошая видимость Good visibility Отличная видимость Excellent visibility	20–50 50 и более over 50	>6 000 >5 000

В России объединение лидара и радиолокатора на единой мобильной платформе для обеспечения всепогодности измерений было осуществлено компанией АО «Лазерные системы» [3].

В результате анализа зависимости рабочих дистанций от метеорологической отражаемости атмосферы [5] было показано, что эффективное функционирование классических радиолокационных доплеровских систем X-диапазона возможно при специфических погодных условиях. В этих условиях отражаемость атмосферных объектов оказывается не ниже определенного значения, которое для оптического диапазона является критическим и резко снижает дальность работы. Поэтому при использовании двух диапазонов, оптического и радиочастотного, появляется погодная «слепая зона». В ней типичные дальности работы обеих систем составляют порядка 2-х и менее километров. Это оказывается неприемлемым для метеорологического комплекса аэронавигации и обеспечения безопасности полетов при изменяющихся в широких диапазонах метеорологических условиях. Кроме того, естественная слепая зона у X-радаров может составлять более 3-х километров.

Математическое моделирование показывает, что добавление радара миллиметрового диапазона (метеолокатор Ka-диапазона) закрывает эту погодную «слепую зону» и позволяет обеспечить всепогодность измерения параметров ветра с минимальной рабочей дистанцией более 5000 метров (рис. 1) в любых погодных условиях, вплоть до средних осадков [3].

В ходе модернизации двухдиапазонного комплекса был разработан и в настоящее время проходит опытную эксплуатацию трехдиапазонный (X, Ka и ИК) комплекс всепогодного метеорологического обеспечения «Ли́ра-3» [6]. Внешний вид комплекса представлен на рис. 2.

Первые экспериментальные исследования совместной работы трех каналов показывают, что наблюдается не только качественное, но и количественное совпадение получаемых значений параметров ветра. Некоторые результаты измерения вертикально профиля скорости ветра, проведенные в апреле 2019 года в Санкт-Петербурге [4], показаны на графиках (рис. 3).

Описанная система способна обеспечивать комплексную всепогодную диагностику метеорологической обстановки на предмет своевременного обнаружения опасных погодных явлений в зоне взлета/посадки. К подобным явлениям относятся сдвиг ветра в приземном слое, вихревые следы за самолетом, Система может определять горизон-

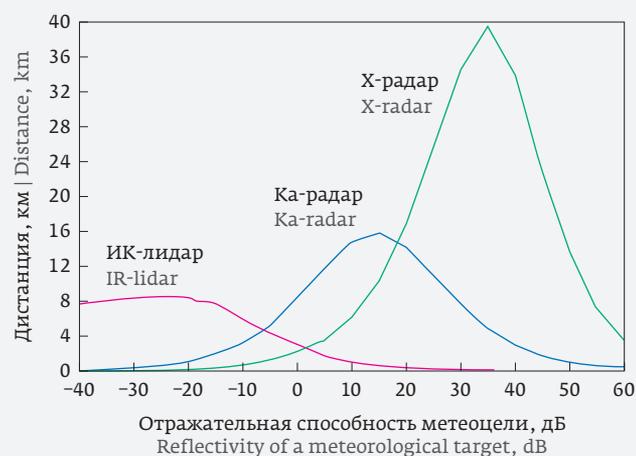


Рис.1. Типичные рабочие дистанции лидара и радаров
Fig. 1. Typical lidar and radar operating distances

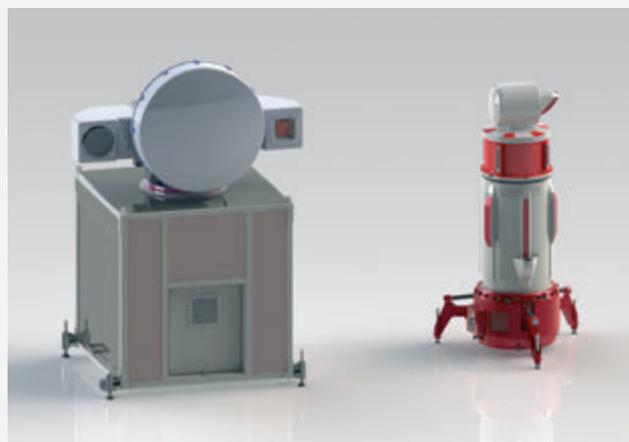


Рис. 2. Лидар-радарный комплекс
Fig. 2. Lidar-radar complex

тальную и вертикальную видимость. Стоит отметить, что эффективность использования таких комплексов значительно возрастает при дооснащении их специальными локальными средствами контроля метеорологической обстановки [2].

При совместной работе 3-х диапазонов зондирования преимущество того или иного диапазона будет определяться состоянием погодных условий, изменяющихся во времени. При изменении метеорологических условий от ясного неба к слабому дождю, а затем к ливню, наибольшей эффективностью соответственно состоянию погодных условий будут обладать: ИК-лидар, метеолокатор Ка-диапазона, метеолокатор X-диапазона.

Еще одно преимущество при таком комплексировании заключается в возможности более точного профилирования атмосферной трассы, классификации наблюдаемых объектов и снижении эффекта экранирования. Так, например, легкое облако или дымка, имеющие крайне слабый отклик в радиочастотных диапазонах, оказываются контрастными для ИК-лидара. В то же время плотное облачное образование, полностью блокирующее ИК-излучение и экранирующее собой последующую атмосферную трассу, становится относительно прозрачным для радиочастотного излучения.

meters (Fig. 1) in all weather conditions, up to average precipitation [3].

In the course of modernization of the two-stage complex, a three-band (X, Ka and IR) complex of all-weather meteorological support "Lira-3" was developed and is currently being tested [6]. The appearance of the complex is shown in Fig. 2.

The first experimental studies of the joint operation of three channels show that there is not only a qualitative, but also a quantitative coincidence of the obtained values of the wind parameters. Some results of measuring the vertical wind speed profile, carried out in April 2019 in St. Petersburg [4], are shown in the graphs (Fig. 3).

The described system is capable to provide comprehensive all-weather diagnostics of the meteorological situation for the timely detection of dangerous weather phenomena in the take-off/landing zone. Such phenomena include wind shear in the surface layer, wake vortexes behind the aircraft. The system can determine the horizontal and vertical visibility. It should be noted that the efficiency of using such complexes increases significantly when they are retrofitted with special local tools of monitoring the meteorological situation [2].

When 3 sensing ranges work together, the advantage of one range or another will be determined by the state

Приглашаем на выставку «Фотоника. Мир лазеров и оптики-2021»

ООО «Лазерные компоненты» - российский поставщик комплектующих к оптоэлектронному, лазерному и тепловизионному оборудованию, а также готовых решений для построения комплексных систем безопасности.

Мы предлагаем:

- лазеры и комплектующие для них; - крупногабаритную оптику, оптику и микрооптику на заказ (призмы, линзы для видимого и ИК-диапазонов);
- активные элементы;
- охлаждаемые и не охлаждаемые тепловизионные модули;
- комплектующие к инфракрасной технике;
- системы тепловизионного мониторинга температуры тела человека.

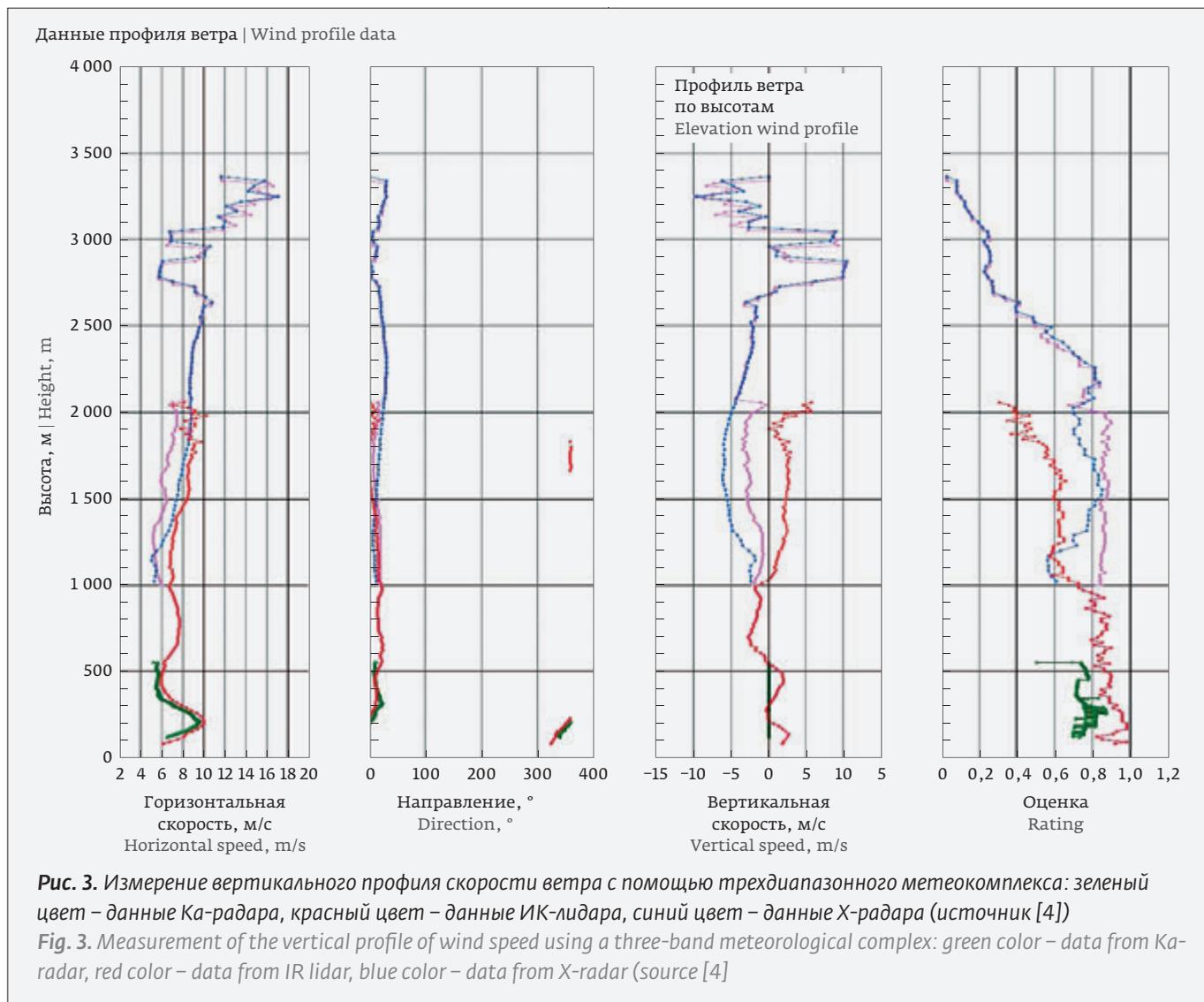
Москва, ЦВК «Экспоцентр»,
Павильон «Форум», стенд №FF090
Москва, Варшавское шоссе, д. 1, стр. 17
+7 (495) 269-40-22;
expo@lasercomponents.ru
www.lasercomponents.ru

«Лазерные компоненты» -
от мелких комплектующих к готовому изделию!



30 марта-
2 апреля





Получая данные о профиле отражаемости атмосферы в каждом из частотных диапазонов, реализуется подобие гиперспектрального профилирования атмосферной трассы. Перспективным направлением также является комплексирование оптико-радиочастотной системы с лидарным каналом измерения химического состава атмосферы. Такие измерения могут оказаться востребованными специалистами не только из области прикладной метеорологии. Результаты будут представлять интерес для климатологии, экологии, технологий ликвидации последствий чрезвычайных происшествий природного и техногенного характера и многих других сфер профессиональной деятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Востребованность оптико-радиочастотных систем дистанционного зондирования атмос-

of weather conditions that change over time. When the meteorological conditions change from a clear sky to a light rain, and then to a rainfall, the IR lidar, Ka-band radar, X-band radar will have the greatest efficiency, according to the state of weather conditions.

Another advantage with such integration is the possibility of more accurate atmosphere path profiling, classification of the observed objects, and a reduction in the screening effect. Thus, for example, a light cloud or haze, which has an extremely weak response in the radio frequency ranges, turns out to be contrasting for an IR lidar. At the same time, the dense cloud formation, completely blocking IR radiation and shielding the subsequent atmosphere path, becomes relatively transparent to RF radiation.

Obtaining data of the atmosphere reflectivity profiles in each of the frequency ranges, a semblance of hyperspectral profiling of the atmosphere path is imple-

феры во всем мире возрастает. Многие применения требуют минимизации массогабаритных параметров и повышения мобильности комплексов вплоть до установки на подвижном шасси. При выполнении таких требований реализация оптико-радиочастотных систем дистанционного зондирования атмосферы путем объединения независимых лидарных и радиочастотных средств зондирования лишь на верхнем уровне обработки получаемых данных оказывается неоптимальной. Комплекс становится дорогим, негабаритным, сложным в развертывании и при транспортировке. В этих условиях перспективы развития видятся в комплексировании средств зондирования не только на уровне обработки сигналов, но и на физическом уровне. Внедрение технологий радиофотоники, активно развивающейся в настоящее время, позволит не только уменьшить массогабаритные характеристики комплексов, но и повысить их эксплуатационные характеристики. Речь идет о малошумящих оптико-радиочастотных задающих генераторах с высокой фазовой стабильностью [7], диаграмм-формирующих оптоэлектронных методах, высокочастотном электрооптическом преобразовании в приемном тракте радиолока-

mented. A promising direction is also the integration of an optical-radio frequency system with a lidar channel for measuring the chemical composition of the atmosphere. Such measurements may be in demand. Specialists not only from the field of applied meteorology can use the results of such measurements. The results will be of interest for climatology, ecology, technologies for liquidation of the consequences of natural and man-made disasters and many other areas of professional activity.

CONCLUSION

The demand for optical-radio-frequency systems for the atmosphere remote sensing is growing all over the world. Many applications require minimizing the weight and size parameters and increasing the mobility of the complexes up to installation on a mobile chassis. When such requirements are met, the implementation of optical-radio-frequency systems for the atmosphere remote sensing by combining independent lidar and radio frequency sensing tools only at the upper level of processing the received data turns out to be suboptimal. The complex becomes expensive, oversized, difficult to deploy and transport. Under these conditions, development prospects are seen in the integration of sensing tools not only at the signal processing level, but



ОАО «Сморгонский завод оптического станкостроения» является крупнейшим производителем технологического оборудования для изготовления оптических деталей на территории СНГ.

Завод производит всю гамму традиционного оборудования для изготовления оптических деталей диаметром от 2 до 2000 мм: заготовительные, шлифовальные, полировальные и полировально-доводочные станки, станки для двухсторонней обработки, центрировочные станки, а также вакуумные установки для нанесения многослойных функциональных покрытий на оптические элементы и различных модифицирующих покрытий на детали из различных материалов. При производстве оборудования применяются современные импортные комплектующие (производства Чехии, Германии, Японии). Все производимое заводом оборудование соответствует техническим регламентам Таможенного Союза, имеется сертификат соответствия стандартам Европейского Союза.

Предприятие выполняет работы по заказам потребителей, оказывает услуги частным и юридическим лицам в сфере вакуумных напылительных технологий, модернизации и ремонта любых вакуумных установок. Предприятие готово предложить разработку и изготовление не только вакуумного оборудования, но и его отдельных компонентов: ионных источников, магнетронов, дуговых испарителей, электронно-лучевых испарителей и т. д.

ОАО «Сморгонский завод оптического станкостроения» заинтересовано в плодотворном сотрудничестве со всеми потенциальными партнерами по различным направлениям.

**ОАО «СМОРГОНСКИЙ
ЗАВОД ОПТИЧЕСКОГО
СТАНКОСТРОЕНИЯ»**



231042, Республика Беларусь, Гродненская
область, г. Сморгонь, ул. Я. Коласа, д. 80
тел.: +375 (1592) 2-48-01,
2-48-15, 2-48-16, 2-48-17
e-mail: omis@szos.by, pa_szos@mail.ru



торов и, наконец, т.н. радиофотонном аналого-цифровом преобразовании [8].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю признательность Д.Н. Васильеву, С.Ю. Страхову и всем коллегам из БГТУ «Военмех» и АО «Лазерные системы», а также Г.Г. Щукину, В.Ю. Жукову и М.Ю. Ильину за участие, полезные советы и дискуссии в ходе работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борейшо 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.
2. **ИВЛ-5000 (WINDEX 5000). Импульсный ветровой лидар (ИВЛ-5000) для мониторинга ветровой обстановки.** URL: <http://lsystems.ru/products/lidary/windex-5000/>.
3. **Щукин Г. Г., Борейшо А. С., Жуков В. Ю., Ильин М. Ю., Коняев М. А.** Лидарно-радиолокационный метеорологический комплекс. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2015; 58 (10-3): 100–103.
4. **Boreysho A. S., Kim A. A., Konyaev M. A., Ilyin M. Y., Shchukin G. G., Zhukov V. Y.** Possibility and application of all-weather lidar-radio sensing complexes. International Conference «Actual Trends in Radiophysics». *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1499: 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/1499/1/012025.
5. **Аэродромные системы дистанционного обнаружения маловысотного сдвига ветра:** документ ICAO: Doc A39-WP / 287. – Международная организация гражданской авиации. 39 сессия, 2016, март 25. URL: <https://www.icao.int/Meetings/a39/Pages/documentation-reference-documents.aspx>.
6. **LIRA. Мобильный многоволновой лидарно-радарный комплекс для мониторинга атмосферы, прогнозирования ветровой обстановки.** URL: <http://lsystems.ru/products/lidary/lira/>.
7. **Никитин А. А., Калинин Б. А.** Теория перестраиваемого спинволнового оптоэлектронного сверхвысоко-частотного генератора. *ЖТФ*. 2015; 75 (9): 141–145.
8. **Земцов Д. С., Злоказов Е. Ю., Небавский В. А., Стариков Р. С., Хафизов И. Ж.** Обработка сигналов X-диапазона радиофотонным АЦП с псевдослучайной выборкой. *Сборник трудов X международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018»*. С-Пб: Университет ИТМО. 2018; 223–225. ISBN 978-5-7577-0588-0.

ОБ АВТОРАХ

Борейшо Анатолий Сергеевич, д. т. н., БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург.

ORCID: 0000-0002-3245-9321

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

ORCID: 0000-0002-8923-2953

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

ORCID: 0000-0001-8884-0861

Михайленко Андрей Сергеевич, АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург.

ORCID: 0000-0002-4710-9594

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

also at the physical level. The introduction of microwave photonic technologies, which are actively developing at present, will allow not only to reduce the mass and size characteristics of the complexes, but also to increase their operational characteristics. We are talking about low-noise microwave photonic master oscillators with high phase stability [7], diagram-forming optoelectronic methods, high-frequency electro-optical conversion in the receiving path of radars and, finally, the so-called radio-photon analog-to-digital conversion [8].

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their sincere gratitude to D. N. Vasiliev, S. Yu. Strakhov and to all peers from BSTU “Voenmekh” and Laser Systems LLC, as well as to G. G. Shchukin, V. Yu. Zhukov and M. Yu. Ilyin for their participation, useful advice and discussions during the work.

REFERENCES

1. **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.2019.13.7.648.657.2.WINDEX 5000.
2. **WINDEX 5000. Impulse wind lidar to monitor wind conditions.** URL: <http://lsystems.ru/en/product/lidars/windex-5000>.
3. **SHCHUKIN G. G., BOREYSHO A. S., ZHUKOV V. YU., ILYIN M. YU., KONYAEV M. A.** Lidarno-radiolokatsionnyy meteorologicheskij kompleks. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Fizika*. 2015; 58 (10-3): 100–103. [In Russ].
4. **Boreysho A. S., Kim A. A., Konyaev M. A., Ilyin M. Y., Shchukin G. G., Zhukov V. Y.** Possibility and application of all-weather lidar-radio sensing complexes. International Conference “Actual Trends in Radiophysics”. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1499: 012025. DOI:10.1088/1742-6596/1499/1/012025.
5. **Low Altitude Wind Shear Remote Detection Aerodrome Systems:** ICAO Document: Doc A39-WP/287. – 39 session of the International Civil Aviation Organization. 2016, March 25. URL: <https://www.icao.int/Meetings/a39/Pages/documentation-reference-documents.aspx>.
6. **LIRA. Multiwave mobile lidar and radar complex for atmospheric monitoring, wind forecasting.** URL: <http://lsystems.ru/en/product/lidars/lira/>.
7. **Nikitin A. A., Kalinikos B. A.** Teoriya perestraivaemogo spinvolnovogo optoelektronnogo sverhvysoko-chastotnogo generatora. *ZHTF*. 2015; 75(9): 141–145. [In Russ].
8. **Zemcov D. S., Zlokazov E. YU., Nebavskij V. A., Starikov R. S., Hafizov I. ZH.** Obrabotka signalov H-diapazona radiofotonnym ACP s psevdosluchajnoj vyborkoj. *Sbornik trudov X mezhdunarodnoj konferencii “Fundamental’nye problemy optiki – 2018”*. S-Pb: Universitet ITMO. 2018; 223–225. ISBN 978-5-7577-0588-0. [In Russ].

ABOUT AUTHORS

Kim A. A., Ph.D, BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov, St. Petersburg.

ORCID: 0000-0002-8923-2953

Boreysho A. S., Dr. Sc., Professor, BSTU “VOENMEH” D. F. Ustinov, St. Petersburg.

ORCID: 0000-0002-3245-9321

M. A. Konyaev, Dr. Sc., BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov, St. Petersburg.

ORCID: 0000-0001-8884-0861

A. S. Michaylenko, Laser Systems JSC, St. Petersburg.

ORCID: 0000-0002-4710-9594

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

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.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО, ПОСТАВКА ПРОМЫШЛЕННЫХ АДДИТИВНЫХ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ



РОБОТИЗИРОВАННАЯ СРЕДНЕГАБАРИТНАЯ УСТАНОВКА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ:

- размер выращиваемого изделия до \varnothing 1300 мм, h – 600 мм
- максимальный вес изделия – 400 кг
- волоконный лазер мощностью до 5 кВт
- производительность – до 250 см³/ч
- контролируемая атмосфера чистого аргона
- 8 синхронно управляемых осей
- порошковый питатель на две колбы
- набор сопел подачи порошка с быстрой заменой
- вакуумируемый шлюз

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ:

- нержавеющие и высокопрочные стали
- жаропрочные никелевые сплавы
- титановые сплавы
- сплавы на основе кобальта и меди

ТЕХНОЛОГИЯ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ – ЭТО АДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

