НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Экспериментальные исследования дистанционного корреляционного лазерного метода измерения мгновенной скорости ветра

04, апрель 2013 DOI: 10.7463/0413.0565048 Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А., Кувшинов А.В., Стрелков Б.В. УДК 551.521

Россия, НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана belov@bmstu.ru ekomonit@bmstu.ru gorod@bmstu.ru

Введение

Скорость и направление ветра необходимо знать для решения многих практических задач: обслуживания полетов летательных аппаратов, прогноза погоды, ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, вызванных утечкой в атмосферу токсичных газов, и др. Причем для каждой задачи имеются свои специфические требования к измеряемым характеристикам ветра.

Во многих случаях наиболее перспективным для дистанционного измерения скорости и направления ветра является использование лидарных методов, так как они могут измерять пространственный профиль скорости и направления ветра в условиях оптически чистого воздуха и имеют гораздо меньшие массо-габаритные характеристики, чем радиолокационные системы.

Лидарные методы измерения скорости и направления ветра разделяются на доплеровские и корреляционные [1-4].

Для реализации лидарных корреляционных методов методы измерения скорости атмосферного ветра требуется более простая аппаратура [1, 2].

В большинстве случаев корреляционные лидары обеспечивают время измерения в диапазоне от единиц до десятков минут. В настоящее время для решения ряда практических задач (например, для обслуживания полетов летательных аппаратов) возникает потребность в дистанционном измерении мгновенной скорости и направления ветра (в измерениях скорости и направления ветра при времени усреднения 2 – 5 секунд). Лидарные корреляционные методы зондирования земной атмосферы могут обеспечить решение этой задачи [1, 2, 5-8].

1. Постановка задачи

В работе [6] предложен дистанционный корреляционный лазерный метод измерения мгновенной скорости и направления ветра. Метод основан на зондировании атмосферы короткими лазерными импульсами, использовании узкого лазерного пучка и адаптивном (в зависимости от состояния атмосферы) выборе измерительной базы для определения скорости ветра.

Ниже описывается созданный макет лидара и приводятся результаты экспериментальных исследований дистанционного корреляционного лазерного метода измерения мгновенной скорости и направления ветра и характеристик неоднородностей коэффициента обратного рассеяния атмосферы.

2. Описание макета корреляционного лидара

Структурная схема макета корреляционного лидара для измерения мгновенной скорости о ветра приведена на рисунке 1.

На рис. 2 представлена фотография макета корреляционного лидара.

Конструктивно приемный и передающий каналы лидара располагались на одной треноге, на которую была установлена оптическая рельса. На этой рельсе располагались два юстировочных столика, на которые монтировались передающий и приемный каналы, соответственно. Таким образом, в макете была возможность регулировки расстояния между осями приемного и передающего каналов, а так же регулировка пространственного положения осей относительно друг друга.





Созданный макет лидара состоит из следующих блоков: лазер; приемный объектив (ОБ); интерференционный фильтр; модуль фотоэлектронного умножителя (МФЭУ); согласующий каскад (СК); аналого-цифровой преобразователь (АЦП); персональный компьютер (ЭВМ); анеморумбометр.

Длина волны излучения макета лидара была выбрана равной 532 нм. В качестве лазера использовался твердотельный лазер YAG:Nd с диодной накачкой и с удвоением частоты NL210, фирмы EKSPLA, Латвия. Основные технические характеристики лазера NL210 [9] приведены в Таблице 1.

Таблица 1

| Параметр | Значение параметра |
|---------------------------|--------------------|
| энергия в импульсе, мДж | 2 |
| длительность импульса, нс | <7 |
| частота повторения, Гц | до 500 |
| расходимость, мрад | < 3 |
| диаметр луча, мм | 0,8 |

Основные технические характеристики лазера NL210.

Лазерные импульсы рассеиваются на аэрозольных частицах, которые всегда присутствуют в атмосфере и переносятся под действием атмосферного ветра. Рассеянное лазерное излучение фокусируется на МФЭУ с помощью приемного объектива ОБ. В качестве объектива в приемном канале используется объектив МС МТО 11, основные технические характеристики которого приведены в Таблице 2.

Для уменьшения помех вызванных фоновым излучением перед МФЭУ был установлен интерференционный фильтр фирмы THORLABS FL-532-1 [10] со следующими параметрами: центральная длина волны 532 нм; спектральная ширина по уровню 0.5 – 1 нм; коэффициент пропускания 0.4; световой диаметр 20 мм.

Таблица 2

| Параметр | Значение параметра |
|------------------------------|--------------------|
| фокусное расстояние, мм | 1000 |
| относительное отверстие | 1:10 |
| коэффициент светопропускания | < 0,70 |
| угловое поле зрения | 2°30' |

Основные технические характеристики приемного объектива.

В качестве приемника оптического излучения использовался модуль ФЭУ фирмы HAMAMATSU H7826-01 [11]. Преимущества данного приемника заключаются в высокой чувствительности, быстродействии и простоты эксплуатации. Использование данного

модуля устраняет необходимость в высоковольтном источнике питания. Так же данный модуль дает возможность регулировать коэффициент усиления ФЭУ в большом диапазоне, что позволяет обеспечить постоянный уровень сигнала при разной метеорологической дальности видимости в атмосфере.

Сигнал с МФЭУ поступает на АЦП, где преобразуется в цифровой вид, и далее поступает в ЭВМ для определения скорости ветра по данным измерений. Для согласования нагрузки ФЭУ и АЦП, а так же усиления, использовался согласующий каскад СК, в качестве которого использовался трансимпедансный усилитель.

В качестве АЦП использовалась прецизионная плата аналого-цифрового преобразования ЛАн10-12PCI-У, которая сопрягается со стандартным компьютерным слотом PCI. Технические характеристики платы [12]: разрешение – 12 бит, максимальная частота дискретизации – 100 МГц.

Для определения достоверности результатов измерения мгновенной скорости ветра макетом корреляционного лидара использовался анеморумбометр "Ветромер-1", внешний вид которого показан на рис. 3. Основные технические характеристики анеморумбометра [13]:

- диапазон измерения мгновенной скорости ветра - 0,7÷55 м/с;

- диапазон измерения направления потока - 0÷360°;

- пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении мгновенной скорости ветра не более ±(0,3+0,05V) м/с, где V – измеряемая скорость воздушного потока в м/с;

- пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении направления воздушного потока - не более ±3°.



3. Методика проведения измерений

Измерения проводились в осеннее - летний период на базе филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в Дмитровском районе Московской области при различных метеоусловиях. Макет лидара был установлен на плоской крыше трехэтажного здания на расстоянии 32 м от края крыши и позволял измерять скорость ветра на расстояниях до ~ 150 м. Анеморумбометр располагался на самом краю крыши в непосредственной близости от лазерного луча.

В качестве измерительных трасс выбирались преимущественно горизонтальные трассы, наклоненные на небольшой угол, так что бы они проходили над уровнем верхушек деревьев находящегося недалеко (несколько сотен метров) леса.

Модуль ФЭУ приемной системы лидара регистрировал временную зависимость P(t) принимаемой мощности. Мощность P(t) регистрируемого приемником лидарного сигнала (приходящего на приемник с расстояния r) описывается выражением [14]:

$$P(t) = \frac{A(r)}{r^2} \cdot T(r) \cdot \beta(r), \qquad (1)$$

где

$$A(\mathbf{r}) = P_0 \cdot \mathbf{K} \mathbf{t} \cdot \mathbf{K} \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_i^2 \cdot \left(\frac{c\tau_{e}}{8}\right) \left(\frac{\alpha_i^2}{\alpha_i^2 + \alpha_e^2}\right) \exp\left(\frac{-\xi_o^2}{(\alpha_i^2 + \alpha_e^2) \cdot \mathbf{r}^2}\right);$$

$$\mathbf{r} = \frac{ct}{2}; \quad \mathbf{T}(\mathbf{r}) = \exp(-2\int_0^r \varepsilon(\mathbf{r}') d\mathbf{r}');$$

 $\beta(r)$ – коэффициент обратного рассеяния, $\epsilon(r)$ – показатель ослабления, r – расстояние, Kr – коэффициент пропускания оптического тракта приемного канала, Kt – коэффициент пропускания оптического тракта передающего канала, c – скорость света, r_{Π} – радиус входного зрачка приемного объектива, τ_{μ} – длительность импульса, α_{μ} – угол расходимости лазерного излучения, α_{Π} – угол поля зрения приемного канала, ξ_{o} – расстояние между оптическими осями приемного и передающего каналов, P_{o} –пиковая мощность излучения в импульсе.

Из (1) видно, что на небольших расстояниях (когда $T(r) \approx 1$) мощность лидарного сигнала зависит только от единственного параметра атмосферы - коэффициента объемного рассеяния β . Таким образом, регистрируемые приемником лидаром флуктуации мощности принимаемого сигнала несут информацию о флуктуациях коэффициента объемного рассеяния:

$$\frac{\mathbf{P}(\mathbf{r}) - \overline{\mathbf{P}}(\mathbf{r})}{\overline{\mathbf{P}}(\mathbf{r})} = \frac{\overline{\beta}}{\overline{\beta}},\tag{2}$$

где $\overline{\beta}$ - среднее значение коэффициента обратного рассеивания, $\widetilde{\beta}$ - флуктуации коэффициента обратного рассеивания, $\overline{P}(r)$ - среднее значение сигналов обратного рассеяния от каждого лазерного импульса.

В блоке обработки приемной системы лидара по формуле (2) вычислялся коэффициент вариации флуктуаций коэффициента объемного рассеяния.

Для устранения очень больших одиночных шумовых всплесков измеренного сигнала использовался двумерный медианный фильтр. Размеры окна этого фильтра составляли 3 отсчета по "дальности" и 51 отсчет по "времени" (по регистрируемым обратно рассеянным лазерным импульсам).

Для сглаживания сигнала и, соответственно, уменьшения уровня шума использовался также фильтр с нулевым смещением фазы. Этот фильтр был реализован как стандартная процедура в программе LabVIEW – Zero Phase Filter. Количество задаваемых коэффициентов

этого фильтра равнялось 200, а их значение было одинаковым и равнялось 1/200. Такие параметры фильтра выбраны исходя из условия эффективности фильтрации и сохранения формы неоднородностей коэффициента объемного рассеяния.

Весь алгоритм обработки сигнала был реализован в среде LabVIEW. В этой же среде осуществлялось управление платой АЦП и передача данных от нее.

4. Результаты измерений

На рисунке 4, для примера, представлено измеренное макетом лидара двумерное поле относительных флуктуаций коэффициента обратного рассеяния, полученное в условиях средней видимости и пасмурной погоде. Здесь по горизонтальной оси отложено время измерения. По вертикальной оси отложено расстояние от рассеивающего объема атмосферы до лидара. При измерении скорость ветра преимущественна была продольная и направлена от макета, поэтому на рис. 4 видно диагональное перемещение неоднородностей с увеличением (с течением времени) расстояния до лидара.



На рис. 5 для двумерного поля относительных флуктуаций коэффициента обратного рассеяния, приведенного на рисунке 4, показана гистограмма распределения коэффициента вариации флуктуаций коэффициента обратного рассеяния.

Значение коэффициента вариации вычислялось для каждого лазерного импульса на расстояниях от 23 и до 100 м от макета и строилась гистограмма распределений коэффициента вариации на протяжении всего времени измерения.



На рис. 6 для двумерного поля относительных флуктуаций коэффициента обратного рассеяния, приведенного на рисунке 4, показана гистограмма распределения размера неоднородностей коэффициента обратного рассеяния.



Из рисунков 5 и 6 видно, что для двумерного поля относительных флуктуаций коэффициента обратного рассеяния, приведенного на рисунке 4, наиболее вероятное значение коэффициента вариации лежит в пределах от 0.67% до 2.16%, а наиболее вероятный размер неоднородностей составляет от 4 до 16 м.

В таблице 3, для примера, приведены результаты измерений мгновенной скорости ветра в точке, где находится анеморумбометр, для 14 различных измерений (проведенных в разное время, при разных метеоусловиях). Обработка результатов измерений двумерных полей относительных флуктуаций коэффициента обратного рассеяния для определения мгновенной скорости ветра проводилась методом с адаптивным выбором измерительной базы, описанным в [6]. Время измерения равнялось 5 с. В первой колонке приведен порядковый номер измерения; во второй - размер а аэрозольных неоднородностей атмосферы (он оценивался по результатам зондирования атмосферы вдоль оптической оси лидара); в третьей колонке – скорость ветра V_{анем} по показаниям анеморумбометра; в четвертой, пятой и шестой колонках – измеренная скорость ветра для измерительной базы ξ_0 равной размеру неоднородностей а (четвертая колонка), базы равной 17 м (пятая колонка) и для постоянной измерительной базы, равной среднему значению неоднородностей <a> (шестая колонка). На основе всех измерений (что составило временной период более чем два месяца) среднее значение размера неоднородностей составило значение 5.4 м. Так как пространственное разрешение макета было 1.5 м, то в качестве среднего значения размера неоднородностей принималось значение 6 м. В седьмой и восьмой колонках – значение параметра Λ для измерительной базы ξ_0 равной размеру неоднородностей а и равной 17 м соответственно (параметр Λ используется для выбора наилучшей измерительной базы в соответствии со следующим критерием [6]: база с меньшим параметром Λ обеспечивает меньшие погрешности измерения скорости ветра). В девятой колонке – значение скорости ветра измеренной с помощью метода с адаптивной измерительной базой (т.е. в соответствии с минимальным значением параметра Λ выбиралось либо значение скорости ветра для измерительной базы равной размеру неоднородностей - колонка четыре, либо для измерительной базы 17 м - колонка пять).

Таблица 3

| No | 0.00/0 | V _{анем} | V, м/с | | Λ | | V. sr/a | |
|----|--------|-------------------|-------------------|--------|-------------|-------|---------|--------------------------|
| | а, м/с | | ξ ₀ =a | ξ₀=17м | ξ₀= <a> | ξ0=a | ξ₀=17м | V _{adapt} , M/C |
| 1 | 7.5 | 2.5 | 2.9 | 0.5 | 3.3 | 0.07 | 1.66 | 2.9 |
| 2 | 6 | 2.0 | 2.1 | 6.1 | 2.1 | 0.04 | 0.15 | 2.1 |
| 3 | 4.5 | 2.1 | 2.2 | 4.3 | 2.7 | 0.003 | 0.01 | 2.2 |
| 4 | 4.5 | 2.1 | 1.2 | 4.9 | 1.5 | 0.004 | 0.007 | 1.2 |
| 5 | 6 | 3.0 | 3.1 | 4.2 | 3.1 | 0.3 | 7.0 | 3.1 |
| 6 | 4.5 | 3.0 | 4.0 | 4.2 | 4.3 | 1.8 | 2.5 | 4.0 |
| 7 | 4.5 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.5 | 3.0 | 0.6 | 4.6 |
| 8 | 4.5 | 4.5 | 1.4 | 4.9 | 1.8 | 3.7 | 0.4 | 4.9 |
| 9 | 6 | 4.5 | 2.9 | 4.3 | 2.9 | 0.09 | 0.02 | 4.3 |
| 10 | 6 | 4.5 | 3.0 | 15 | 3.0 | 0.01 | 0.02 | 3.0 |
| 11 | 4.5 | 5.7 | 4.9 | 6.1 | 5.4 | 2.2 | 0.8 | 6.1 |
| 12 | 4.5 | 5.7 | 5.0 | 5.5 | 4.3 | 0.5 | 0.07 | 5.5 |
| 13 | 6 | 6.7 | 8.7 | 8.1 | 8.7 | 0.3 | 0.07 | 8.1 |
| 14 | 6 | 6.7 | 3.8 | 5.4 | 3.8 | 0.02 | 0.01 | 5.4 |

Натурные измерения мгновенной скорости ветра

Средняя относительная погрешность измерения мгновенной скорости ветра корреляционным методом с адаптивным выбором измерительной базы составила 15%.

На рисунке 7 приведен пример профиля ветра, полученного в ходе натурного измерения мгновенных скоростей ветра, при значении скорости ветра измеренной с помощью анеморумбометра 5.7 м/с.



На данном рисунке кривая 1 – скорость ветра измеренная с помощью метода с адаптивным выбором измерительной базы, кривая 2 – с помощью метода, в котором измерительная база равна размеру неоднородностей. Также на рисунке показано значение скорости ветра измеренной с помощью анеморумбометра в виде ромба и погрешность измерения анеморумбометра. Анеморумбометр располагался на расстоянии 31 м от макета.

Из рисунка видно, что адаптивный выбор измерительной базы позволяет заметно уменьшить погрешности измерения скорости ветра.

Таким образом, результаты натурных экспериментов показывают, что адаптивный выбор размера измерительной базы позволяет увеличить точность определения мгновенной скорости ветра корреляционным лидаром.

Список литературы

1. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра /

Г.Г. Матвиенко, Г.О. Заде, Э.С. Фердинандов и др. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.

2. Применение корреляционных методов в атмосферной оптике / В.М. Орлов,

Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов и др. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.

3. Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 320 с.

4. Мензис Р.Т., Хардести Р.М. Когерентный доплеровский лидар для измерения полей ветра // ТИИЭР (Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике) : пер. с англ. 1989. Т. 77, № 3. С. 57-70. [Menzies R.T., Hardesty R.M. Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields // Proc. IEEE. 1977. Vol. 77, no. 3. P. 449-462. DOI: 10.1109/5.24130]

5. Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В., Рыбалко В.С., Борцов Ю.Н., Шелефонтюк Д.И., Вореводин М.Ю. Оперативное определение компонентов скорости ветра с помощью лидара // Оптика атмосферы и океана. 1988. Т. 1, № 2. С. 68-72.

6. Козинцев В.И., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А. Лазерный метод оперативного измерения скорости и направления ветра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2011. № 1. С. 57-66.

7. Козинцев В. И., Иванов С. Е., Белов М. Л., Городничев В. А., Смирнова О.А. Лазерный метод оперативного измерения скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2009. Спец. вып. "Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов". С. 232-236.

 Козинцев В.И., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Лазерный дистанционный метод оценки мгновенной скорости и направления ветра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2009. Спец. вып. "Современные проблемы оптотехники ". С. 70-77.

9. Ekspla. Режим доступа: <u>http://www.ekspla.com</u> (дата обращения: 13.03.2012).

10. Thorlabs. Режим доступа: <u>http://thorlabs.com</u> (дата обращения: 13.03.2012).

11. Hamamatsu. Режим доступа: <u>http://sales.hamamatsu.com</u> (дата обращения: 13.03.2012).

12. ЗАО "Руднев-Шиляев". Режим доступа: <u>http://rudshel.ru</u> (дата обращения: 13.03.2012).

13. Метеоприбор. Режим доступа: <u>http://www.meteopribor.ru/wind/vetromer.htm</u> (дата обращения: 13.03.2012).

14. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды /
В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 528 с.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Experimental studies of the remote correlation laser method for measuring instantaneous wind speed # 04, April 2013 DOI: 10.7463/0413.0565048 Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kuvshinov A.V., Strelkov B.V.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation <u>belov@bmstu.ru</u> <u>ekomonit@bmstu.ru</u> <u>gorod@bmstu.ru</u>

The authors describe a laser lidar model for remote measurement of instantaneous speed and direction of atmospheric winds. The authors provide the results of experimental studies in the surface layer of the remote correlation laser method for measuring instantaneous wind speed and characteristics of aerosol backscatter coefficient heterogeneities of the atmosphere. It is shown that the measurement of aerosol size heterogeneities and adaptive selection of size measurement framework in accordance with the found criterion can increase determination accuracy of instantaneous wind speed by correlation lidars.

Publications with keywords: instantaneous wind velocity and direction, laser remote sensing method

Publications with words: instantaneous wind velocity and direction, laser remote sensing method

References

1. Matvienko G.G., Zade G. O., Ferdinandov E. S., et al. *Korreliatsionnye metody lazerno-lokatsionnykh izmerenii skorosti vetra* [Correlation methods of laser-radar measurements of wind speed]. Novosibirsk, Nauka, 1985. 223 p.

2. Orlov V.M., Matvienko G.G., Samokhvalov I.V., et al. *Primenenie korreliatsionnykh metodov v atmosfernoi optike* [Application of correlation methods in atmospheric optics]. Novosibirsk, Nauka, 1983. 160 p.

3. Zakharov V.M., Kostko O.K., Khmelevtsov S.S. *Lidary i issledovanie klimata* [Lidars and climate research]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990. 320 p.

4. Menzies R.T., Hardesty R.M. Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields. *Proc. IEEE*, 1977, vol. 77, no. 3, pp. 449-462. DOI: <u>10.1109/5.24130</u> (Russ. ed.: Menzis R.T., Khardesti

R.M. Kogerentnyi doplerovskii lidar dlia izmereniia polei vetra. *TIIER*, 1989, vol. 77, no. 3, pp. 57-70.).

5. Matvienko G.G., Samokhvalov I.V., Rybalko V.S., Bortsov Iu.N., Shelefontiuk D.I., Vorevodin M.Iu. Operativnoe opredelenie komponentov skorosti vetra s pomoshch'iu lidara [High-Data-Rate Lidar Sounding of Wind Velocity Components]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 1988, vol. 1, no. 2, pp. 68-72.

6. Kozintsev V.I., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Lazernyi metod operativnogo izmereniia skorosti i napravleniia vetra [Laser method of prompt measurement of wind speed and direction]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. "Priborostroenie"* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2011, no. 1, pp. 57-66.

7. Kozintsev V. I., Ivanov S. E., Belov M. L., Gorodnichev V. A., Smirnova O.A. Lazernyi metod operativnogo izmereniia skorosti i napravleniia vetra v prizemnom sloe atmosfery [Laser method of timely measurement of wind velocity and direction in near-earth atmosphere

layer]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. "Priborostroenie"* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2009, *Spets. vyp. "Antenny i ustroistva radio- i opticheskogo diapazonov"* [Antennas and devices of radio and optical bands], pp. 232-236.

8. Kozintsev V.I., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. Lazernyi distantsionnyi metod otsenki mgnovennoi skorosti i napravleniia vetra [Laser remote method for estimation of instantaneous velosity and direction of wind]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser.* "*Priborostroenie*" [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2009, *Spets. vyp.* "*Sovremennye problemy optotekhniki*" [Spec. iss. "Modern problems of optical engineering"], pp. 70-77.

9. *Ekspla*. Available at: <u>http://www.ekspla.com</u> , accessed 13.03.2012.

10. *Thorlabs*. Available at: <u>http://thorlabs.com</u>, accessed 13.03.2012.

11. Hamamatsu. Available at: http://sales.hamamatsu.com, accessed 13.03.2012.

12. ZAO "Rudnev-Shiliaev" [CJSC "Rudnev-Shiliaev"]. Available at: <u>http://rudshel.ru</u>, accessed 13.03.2012.

13. "*Meteopribor*". Available at: <u>http://www.meteopribor.ru/wind/vetromer.htm</u>, accessed 13.03.2012.

14. Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Optiko-elektronnye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoi sredy* [Optical-electronic systems of environmental monitoring of the natural environment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 528 p.