

УДК 551.521

В. И. Козинцев, С. Е. Иванов,  
М. Л. Белов, В. А. Городничев,  
Б. В. Стрелков

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАТИВНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА С АДАПТИВНЫМ ВЫБОРОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ БАЗЫ

*Описан макет корреляционного лидара с малой измерительной базой. Приведены результаты экспериментальных исследований в приземном слое атмосферы оперативного метода измерения скорости ветра с адаптивным выбором измерительной базы. Показано, что измерение размера аэрозольных неоднородностей и адаптивный выбор размера измерительной базы в соответствии с найденным критерием позволяют увеличить точность оперативного определения скорости ветра корреляционными лидарами.*

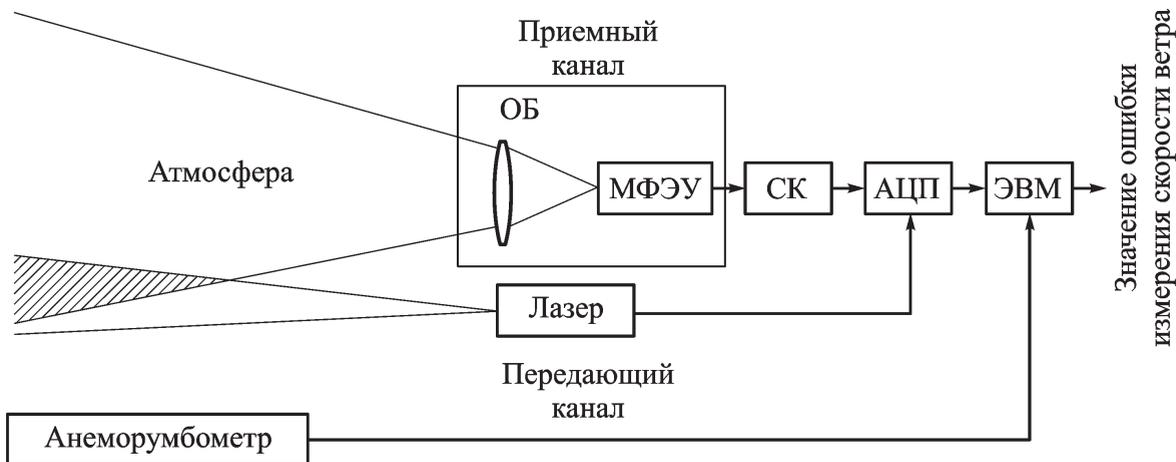
**E-mail:** [ekomonit@mx.bmstu.ru](mailto:ekomonit@mx.bmstu.ru)

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, измерение скорости ветра, оперативный метод, адаптивный выбор измерительной базы.

Необходимость оперативного получения пространственного распределения параметров ветра, а также данных о ветре, усредненных по трассе, требует развития существующих дистанционных методов измерения скорости и направления атмосферного ветра. Для многих практических приложений наиболее перспективными дистанционными методами измерения скорости ветра являются лазерные (хотя возможности лазерных методов не перекрывают напрямую возможностей радиолокационных методов). Наиболее простыми из лазерных методов измерения скорости ветра (и требующими менее дорогую аппаратуру) являются корреляционные методы [1, 2].

В большинстве случаев время накопления информации ветровых корреляционных лидаров составляет единицы и десятки минут. Необходимость оперативного (единицы секунд) измерения требуют развития существующих лазерных методов измерения скорости и направления атмосферного ветра. Лидарные методы могут обеспечить необходимое сокращение времени накопления информации. При этом естественный путь заключается в использовании лидаров с малой измерительной базой [1–3].

В работе [4] описан лазерный метод определения пространственного распределения скорости и направления ветра в приземном слое



**Рис. 1. Структурная схема макета для измерения скорости атмосферного ветра**

атмосферы. Показано, что измерение размера аэрозольных неоднородностей вдоль трассы зондирования и изменение размера измерительной базы в соответствии с найденным критерием позволяет увеличить точность оперативного определения скорости ветра корреляционными лидарами с малой измерительной базой.

Далее описывается созданный макет корреляционного лидара с малой измерительной базой и приводятся результаты экспериментальных исследований в приземном слое атмосферы оперативного метода измерения скорости ветра с адаптивным выбором измерительной базы.

Структурная схема макета для измерения скорости атмосферного ветра приведена на рис. 1.

Созданный макет состоит из лазера, приемного объектива (ОБ), интерференционного фильтра, модуля ФЭУ (МФЭУ); согласующего каскада (СК), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), персонального компьютера (ЭВМ); анеморумбометра.

Лазер генерирует короткие импульсы на длине волны 532 нм, которые посылаются в атмосферу. Лазерные импульсы рассеиваются в атмосферном аэрозоле, рассеянное лазерное излучение фокусируется приемным объективом ОБ на МФЭУ. Излучение рассеивается на аэрозольных частицах, которые всегда присутствуют в атмосфере и переносятся под действием атмосферного ветра. Для уменьшения помех, вызванных фоновым излучением, используется интерференционный фильтр. 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 также для усиления применяется согласующий каскад СК, в качестве которого использовался трансимпедансный усилитель. Достоверность результатов измерения макета определяется анеморумбометром.

Конструктивно приемный и передающий каналы располагались на одной треноге, на которую была установлена оптическая скамья. На этой скамье располагались два юстировочных столика, на которые

монтировались лазер и приемный канал. Таким образом, было возможно регулировать расстояние между оптическими осями приемного и передающего каналов, а также пространственное положение осей приемного и передающего каналов относительно друг друга.

При проведении экспериментов использовался твердотельный лазер YAG:Nd с диодной накачкой и с удвоением частоты NL210 фирмы EKSPLA, Латвия. Лазер имел воздушное охлаждение. Габаритные размеры блока излучателя составляли 164×274×93 мм, габаритные размеры блока питания — 340×365×290 мм.

***Основные технические характеристики используемого лазера***

Длина волны излучения, нм .....	532
Энергия в импульсе, мДж .....	2
Длительность импульса, нс .....	Не более 7
Частота повторения, Гц .....	До 500
Расходимость, мрад .....	Не более 3
Диаметр луча, мм .....	0,8
Стабильность энергии в импульсе, СКО, % .....	Не более 1

В приемном канале макета лидара использовался фотографический объектив МС МТО 11 производства Лыткаринского завода оптического стекла.

***Характеристики объектива***

Фокусное расстояние, мм .....	1000
Относительное отверстие .....	1:10
Коэффициент светопропускания .....	Не более 0,70
Угловое поле зрения .....	2°30'

В качестве фотоприемника оптического излучения был использован модуль ФЭУ фирмы HAMAMATSU H7826-01. Преимущества данного приемника заключаются в высокой чувствительности, быстродействии и простоте эксплуатации. Использование модуля H7826-01 устраняет необходимость в высоковольтном источнике питания. Данный модуль позволяет регулировать коэффициент усиления ФЭУ в большом диапазоне, таким образом можно добиться постоянного уровня сигнала при разной метеорологической дальности видимости атмосферы.

***Основные технические характеристики модуля фотозлектронного умножителя***

Диаметр фоточувствительной площадки, мм .....	15
Диапазон регулировки усиления .....	1–1000
Длина волны максимальной чувствительности, нм .....	380
Темновой ток:	
типичное значение, нА .....	3
максимальное значение, нА .....	20
Время нарастания сигнала, нс .....	1,5

Перед фотоэлектронным умножителем в макете корреляционного лидара был установлен интерференционный фильтр фирмы THORLABS FL-532-1.

### *Характеристики интерференционного фильтра*

Центральная длина волны, нм .....	532
Спектральная ширина по уровню 0,5, нм.....	1
Коэффициент пропускания .....	0,4
Световой диаметр, мм .....	20

Сигнал с ФЭУ поступал на трансимпедансный усилитель и далее в АЦП. Использованный в макете трансимпедансный усилитель состоял из двух каскадов усилителей EL740A фирмы ЗАО “Лаборатория Электроники”.

В макете корреляционного лидара в качестве АЦП использовалась прецизионная плата аналогово-цифрового преобразования для РС ЛАн10-12РСІ-У производства ЗАО “Руднев–Шиляев”, которая сопрягается со стандартным компьютерным слотом РСІ. Аналогово-цифровой преобразователь (тип АЦП — последовательно-параллельный) имеет два синхронных аналоговых канала (входная полоса частот каждого аналогового канала составляет 40 МГц), разрешение 12 бит и максимальную частоту дискретизации 100 МГц.

Сигнал с выхода АЦП поступал в ЭВМ.

Для определения ошибки измерения скорости ветра в ЭВМ поступали данные с анеморумбометра.

В макете используется анеморумбометр “Ветромер-1”.

### *Основные технические характеристики анеморумбометра*

Диапазон измерения мгновенной, максимальной и средней (за 2 и 10 мин) скоростей потока, м/с.....	0,7–55
Диапазон измерения направления потока .....	0–360°
Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении мгновенной, максимальной и средней скоростей потока, м/с ( $V$ – измеряемая скорость воздушного потока, м/с).....	не более $\pm(0,3 + 0,05V)$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении направления воздушного потока.....	не более $\pm 3^\circ$

Измерения проводились на базе филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Дмитровский район Моск. обл.) 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  $\sim 150$  м. Анеморумбометр располагался на самом краю крыши в непосредственной близости от лазерного луча. В созданном макете не было реализовано пространственное сканирование

лазерного луча, поэтому результаты получены только для случая, когда оптическая ось лидара совпадала с направлением ветра.

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

### Погрешности измерения скорости ветра при натуральных экспериментах

Номер измерения	$d$ , м	$V_{ан}$ , м/с	$\Delta V$ , м/с			$\Lambda$	
			$\xi_0 = d$	$\xi_0 = 9$ м	адаптивно выбираемая база	$\xi_0 = d$	$\xi_0 = 9$ м
1	7,5	2,5	0,7	0,35	0,35	0,17	0,15
2	6,0	2,0	0,5	0,2	0,5	0,002	0,12
3	4,5	2,1	0,4	8,4	0,4	0,006	0,01
4	4,5	2,8	1,2	0,5	0,5	0,05	0,03
5	4,5	4,5	0,7	1,5	0,7	3,2	3,8
6	6,0	3,0	1,2	3,1	1,2	0,4	0,6
7	4,5	3,0	0	0,3	0	2,1	2,2
8	6,0	4,5	0,4	2,3	0,4	0,45	0,5
9	4,5	5,7	4,6	0,4	0,4	0,2	0,05
10	6,0	6,7	1,7	1,5	1,5	0,075	0,06

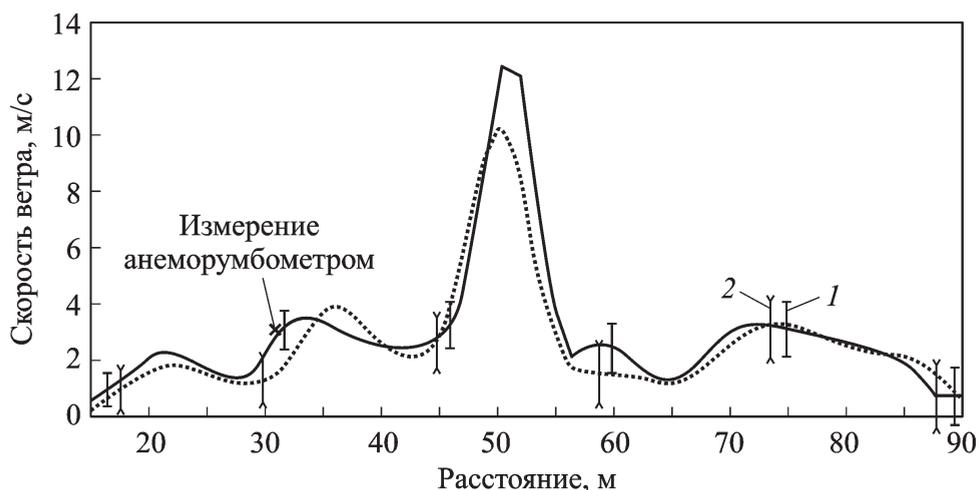
В таблице даны результаты измерений скорости ветра в точке, где находился анемометр, для 10 различных измерений (проведенных в разное время при различных метеоусловиях). В первой колонке приведен порядковый номер измерения; во второй — размер  $d$  аэрозольных неоднородностей атмосферы (его оценивали по результатам зондирования атмосферы вдоль оптической оси лидара); в третьей колонке — скорость ветра  $V_{ан}$  по показаниям анеморумбометра; в четвертой, пятой и шестой колонках — абсолютные значения ошибок измерения скорости ветра для измерительной базы  $\xi_0$ , равной размеру неоднородностей  $d$  (четвертая колонка), для базы, равной 9 м (пятая колонка; размер  $\sim 9$  м соответствует, согласно математическому моделированию, оптимальному размеру измерительной базы для времени наблюдения 5 с при минимальной измеряемой скорости ветра 2 м/с), и для измерительной базы, выбираемой в соответствии с минимумом параметра  $\Lambda$  (шестая колонка; адаптивно выбираемая база); в седьмой и восьмой колонках приведены значения параметра  $\Lambda$  для измерительной базы  $\xi_0$ , равной размеру неоднородностей  $d$  и 9 м соответственно.

Из таблицы следует, что для большинства измерений по значению параметра  $\Lambda$  действительно можно судить о погрешностях измерения

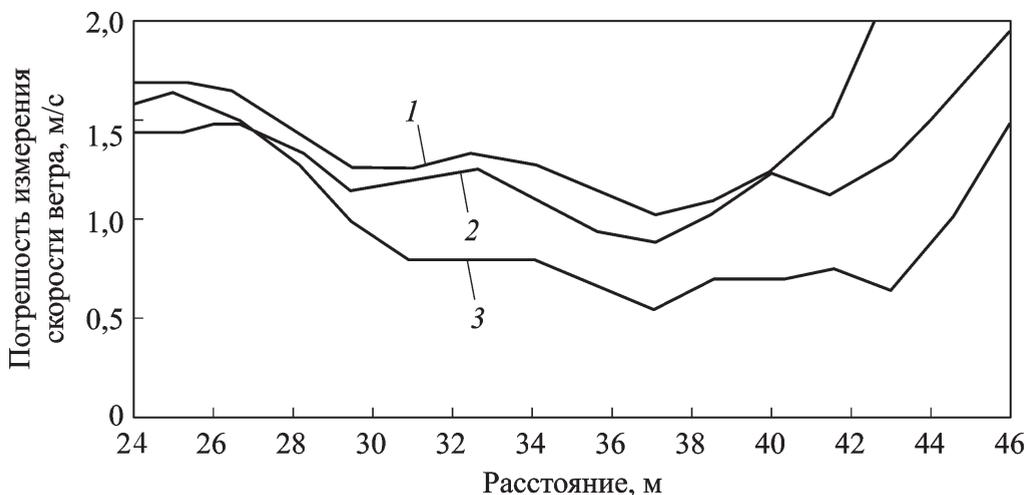
скорости ветра  $\Delta V$ : база с меньшим значением параметра  $\Lambda$  обеспечивает меньшие погрешности измерения скорости ветра. Исключение составляет только измерение № 2 для самой небольшой скорости ветра 2 м/с. Но здесь ошибки  $\Delta V$  невелики (по абсолютной величине) и все равно какая измерительная база будет выбрана.

На рис. 2 приведена зависимость экспериментально измеренной скорости ветра от расстояния до лидара для двух методов измерения (сплошная кривая — адаптивный выбор измерительной базы, штриховая кривая — измерительная база равна размеру неоднородностей). В эксперименте скорость по анеморумбометру составляет 3 м/с (расстояние, на котором находился анеморумбометр, отмечено крестиком), размер неоднородностей 6 м, коэффициент вариации неоднородностей равен 1,4%. На рис. 2 вертикальными линиями показаны доверительные интервалы для двух методов измерения (1 — для метода с адаптивным выбором измерительной базы, 2 — для метода с измерительной базой, равной размеру неоднородностей).

На рис. 3 приведены погрешности измерения скорости ветра в окрестности анеморумбометра (на расстояниях от 24 до 46 м от лида-



**Рис. 2.** Зависимость экспериментально измеренной скорости ветра от расстояния до лидара



**Рис. 3.** Погрешности измерения скорости ветра

ра) для трех размеров измерительной базы: 4,5 м (постоянное значение базы, равное наиболее вероятному размеру неоднородностей) — кривая 1; база, равная размеру неоднородностей, — кривая 2; адаптивно выбираемая база — кривая 3. Погрешность измерения находилась как абсолютное значение разности показаний анеморумбометра и измеренного значения скорости ветра. Расстояние (по оси абсцисс) отчитывалось от макета лидара. Измеренный пространственный профиль скорости ветра предварительно сглаживался. Значения погрешностей усреднено по 10 измерениям (см. таблицу).

Из рис. 2 и 3 следует, что адаптивный выбор измерительной базы позволяет заметно уменьшить погрешности измерения скорости ветра.

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что изменение размера аэрозольных неоднородностей и адаптивный выбор размера измерительной базы в соответствии с найденным критерием позволяют повысить точность оперативного определения скорости ветра корреляционными лидарами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о р р е л я ц и о н н ы е методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Заде, Э.С. Фердинандов и др. – Новосибирск: Наука, 1985. – 223 с.
2. П р и м е н е н и е корреляционных методов в атмосферной оптике / В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов и др. – Новосибирск: Наука, 1983. – 160 с.
3. М а т в и е н к о Г. Г., С а м о х в а л о в И. В., Р ы б а л к о В. С. и др. Оперативное определение компонент скорости ветра с помощью лидара // Оптика атмосферы и океана. – 1988. – Т. 1. – № 2. – С. 68–72.
4. К о з и н ц е в В. И., И в а н о в С. Е., Б е л о в М. Л., Г о р о д н и ч е в В. А. Лазерный метод оперативного измерения скорости и направления ветра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 57–66.

Статья поступила в редакцию 19.09.2011

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р. техн. наук. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.I. Kozintsev (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.). Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р. техн. наук, вед. научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L. Belov (b. 1950) graduated from the Moscow Power Engineering Institute in 1973. D. Sc. (Eng.), leading researcher of the Research Institute for Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optics of atmosphere.

Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р техн. наук, зав. кафедрой “Элементы приборных устройств” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.A. Gorodnichev (b. 1952) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1976. D. Sc. (Eng.), head of “Elements of Instrumental Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Сергей Евгеньевич Иванов родился в 1982 г., окончил в 2007 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области атмосферной оптики.

S.E. Ivanov (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Researcher of the Research Institute for Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of optics of atmosphere.

Борис Викторович Стрелков родился в 1947 г., окончил в 1971 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, декан факультета “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области лазерной и измерительной техники.

B.V. Strelkov (b. 1947) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), dean of “Radio-Electronics and Laser Technology” faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of the laser and measuring technology.

