УДК 551.521

На правах рукописи

Иванов Сергей Евгеньевич

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННОЙ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА ЛАЗЕРНЫМ ЛОКАТОРОМ

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Городничев Виктор Александрович,** доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Юдин Владимир Иванович,** доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета

Березин Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Всероссийского НИИ автоматики им. Н.Л. Духова

Ведущая организация: Томский государственный университет, г. Томск

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2017969
Иванов С.Е. Методы дистанци

Защита диссертации состоится «13» марта 2013 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5., стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.19.

Автореферат разослан «23» января 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.141.19
д. т. н., профессор

Бурый Е.В.

ОНА УПС

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Величину скорости и направления ветра необходимо знать для решения многих практических задач: прогноза погоды, охраны окружающей среды, ликвидации последствий катастроф и чрезвычайных ситуаций, обслуживания полетов летательных аппаратов, научных исследований и других задач прикладной метеорологии. Причем для каждой задачи имеются свои специфические требования к измеряемым характеристикам ветра.

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

Дистанционные методы измерения скорости и направления ветра, которые используются в лазерных локаторах, разделяются на доплеровские и корреляционные. Для реализации корреляционных методов используется более простая аппаратура. Также, корреляционные методы позволяют проводить, в отличие от доплеровских методов, дистанционные измерения профиля скорости и направления ветра в условиях сложного рельефа местности, когда скорость и направление ветра существенно изменяются вдоль трассы зондирования.

Лазерные измерители скорости и направления ветра, реализующие корреляционные методы измерения, разрабатывались в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, в Томском государственном университете, Институте электроники Болгарской АН и в других организациях. Основы лазерных корреляционных методов измерения скорости и направления ветра были заложены в работах Матвиенко Г.Г., Самохвалова И.В. и др.

В большинстве случаев корреляционные лидары обеспечивают время измерения в диапазоне от единиц до десятков минут, а измерения проводятся при большом отношении сигнал/шум.

В настоящее время для решения ряда задач прикладной метеорологии возникает потребность в дистанционном измерении мгновенной скорости и направления ветра, т. е. время измерения не должно превышать нескольких секунд. Поэтому актуальной является задача разработки методов измерения мгновенной скорости и направления ветра, которые позволили бы проводить измерения на больших расстояниях при малом отношении сигнал/шум.

Цель диссертационной работы и задачи исследований

Целью работы является разработка методов дистанционного измерения мгновенной скорости и направления ветра лазерным локатором.

Основные задачи:

1. Разработка методов измерения мгновенной скорости и направления ветра, использующих данные оперативных измерений характеристик аэрозольных неоднородностей атмосферы вдоль трассы зондирования.

2. Исследование на основе математического моделирования погрешностей измерения величины мгновенной скорости и направления ветра для разработанных методов при разных состояниях атмосферы.
3. Разработка алгоритмов обработки результатов дистанционных лазерных измерений, позволяющих определять мгновенную скорость и направление ветра.
4. Экспериментальная апробации разработанных методов и алгоритмов обработки для задачи измерения мгновенной скорости ветра.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы математического моделирования, математический аппарат теории вероятности, корреляционный анализ.

Научная новизна исследований

1. Разработан метод измерения величины мгновенной скорости и направления ветра с адаптацией размера измерительной базы – расстояния между исследуемыми объемами атмосферы – по данным оперативного измерения размера аэрозольных неоднородностей атмосферы вдоль трассы зондирования, позволяющий проводить измерения даже при малом отношении сигнал/шум и использующий пространственное сканирование атмосферы одним лазерным лучом.
2. Предложен критерий выбора величины измерительной базы, которая обеспечивает минимальные погрешности измерений при использовании временного корреляционного метода измерения скорости ветра.
3. Разработан однолучевой, не требующий пространственного сканирования, метод приближенного измерения величины мгновенной скорости и направления ветра.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Метод измерения величины мгновенной скорости и направления ветра с адаптацией размера измерительной базы позволяет получать средние относительные погрешности измерения от 5% до 20% для скорости и средние абсолютные погрешности от 5° до 20° для направления ветра, в зависимости от отношения сигнал/шум и величины скорости ветра, и позволяет уменьшить погрешность измерения скорости ветра на 0,1…1,9 м/с по сравнению с методом, использующим измерительную базу равную размеру неоднородностей.
2. Критерий выбора величины измерительной базы, которая обеспечивает минимальные погрешности измерений при использовании временного корреляционного метода измерения скорости ветра.
3. Метод приближенного измерения величины мгновенной скорости и направления ветра позволяет получать оценку мгновенной скорости и направления ветра с относительной погрешностью 20 – 30% для скорости и абсолютной погрешностью 25 – 30° для направлению ветра.

4. Результаты экспериментальной апробации разработанного метода измерения величины мгновенной скорости ветра с адаптацией размера измерительной базы показывают возможность измерения мгновенной скорости ветра со средней относительной погрешностью 15%.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке перспективных образцов дистанционных лазерных измерителей скорости и направления ветра для решения задач прикладной метеорологии.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты работы использованы в НИР «Разработка корреляционного лидара для оперативного измерения скорости и направления ветра», «Разработка экспериментального образца корреляционного лидара для оперативного измерения скорости и направления ветра», «Проведение натурных испытаний экспериментального образца корреляционного лидара для оперативного измерения скорости и направления ветра» и в учебном процессе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе «Проектирование лазерных систем экологического мониторинга».

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на IX (Италия, о. Сицилия, 2007 г.), X (Тунис, г. Монастир, 2008 г.), XI (Черногория, 2009 г.), XII (Кипр, 2010 г.) и XIII (Испания, 2011 г.) научно-технических конференциях «Медико-технические технологии на страже здоровья», а так же на Всероссийской научно-практической конференции "Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения", г. Воронеж, 2009 г.

Публикации

Результаты работы изложены в пяти статьях в журналах, входящих в перечень ВАК, на разработанный метод получен патент РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, содержащего 117 наименования. Общий объем работы – 155 страниц, включая 70 рисунков и 31 таблиц.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность измерения величины мгновенной скорости и направления атмосферного ветра в ряде прикладных задач. Рассмотрена постановка задачи разработки дистанционных методов измерения величины мгновенной скорости и направления ветра, позволяющих проводить измерения на больших расстояниях при малом отношении сигнал/шум.

В первой главе рассмотрены временные и пространственные характеристики атмосферного ветра. Описаны основные параметры

аэрозольной атмосферы: характерные размеры неоднородностей, их времена жизни, коэффициенты вариации для высокочастотных и низкочастотных флуктуаций коэффициента аэрозольного рассеяния.

Во второй главе рассмотрены основные методы лазерного дистанционного измерения скорости ветра.

Корреляционные методы обладают рядом преимуществ (измерение профиля скорости и направления ветра в условиях сложного рельефа местности, когда скорость и направление ветра существенно изменяются вдоль трассы зондирования; для реализации корреляционных методов требуется более простая аппаратура), которые делают их перспективными для дистанционного измерения мгновенной скорости и направления ветра.

Лазерные корреляционные методы основаны на регистрации мощности $P(L)$ обратно рассеянного атмосферным аэрозолем лазерного сигнала, которая в прозрачной атмосфере определяется следующим выражением:

$$P(L) = c\tau_u S_r \beta(L) b(\pi) T_v P_0 G(L) / 2L^2, \qquad (1)$$

где c – скорость света, τ_u – длительность лазерного импульса, S_r – площадь приемного объектива, $\beta(L)$ – коэффициент объемного рассеяния, $b(\pi)$ – индикатриса рассеяния, $T_v^{1/2}(L) = \exp\left(-\int_0^L \beta(z)dz\right)$ – коэффициент пропускания атмосферы, P_0 – мощность лазерного излучения, $G(L)$ – геометрическая функция лидара, L – расстояние от лидара до зондируемого объема атмосферы.

Из формулы видно, что анализ пространственных реализаций мощности обратно рассеянного атмосферным аэрозолем лазерного сигнала позволяет определять характеристики флуктуаций поля коэффициента объемного рассеяния атмосферы и измерять перемещение этого поля (т.е. проводить измерение параметров ветра).

При измерении мгновенной скорости ветра корреляционный метод может быть редуцирован до метода подобия (так как время проведения измерений, как правило, меньше характерных времен жизни неоднородностей). Поэтому для определения скорости ветра V использовалось упрощенное выражение:

$$V = \frac{\xi_0}{\tau}, \qquad (2)$$

где ξ_0 – величина измерительной базы, τ – временной сдвиг максимума корреляционной функции (или минимума структурной функции) двух сигналов, регистрируемых от двух исследуемых объемов атмосферы, разнесенных на измерительную базу.

Третья глава посвящена математическому моделированию сигналов регистрируемых корреляционным лидаром. Подробно рассматриваются методы моделирования двумерных полей.

Разработана математическая модель, которая позволяет моделировать регистрируемые корреляционным лидаром сигналы для разных состояний атмосферы. Данная модель учитывает перемещение поля коэффициента обратного рассеяния под действием средней скорости ветра, флуктуации прозрачности атмосферы от лидара до исследуемых объемов, размеры исследуемых объемов и шум измерения.

Четвертая глава посвящена разработанным методам дистанционного измерения мгновенной скорости и направления ветра лазерным локатором.

Рассмотрен известный временной корреляционный метод измерения мгновенной скорости и направления ветра с помощью импульсного лидара, а так же метод, использующий большее количество исследуемых объемов атмосферы. Показано, что эти методы имеют большие погрешности измерения скорости ветра и направления ветра, несмотря на преимущество последнего над корреляционным методом.

Далее описан разработанный однолучевой лазерный метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра, не требующий пространственного сканирования лазерного луча. Исходной информацией для этого метода являются пространственные реализации объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы вдоль трассы зондирования, полученные для каждого зондирующего импульса. Данные реализации, полученные в течение времени измерения $T_{изм}$ равного единицам секунд, размещаются на плоскости «время измерения – расстояние от лидара» в соответствии со временем посылки зондирующего лазерного импульса.

Для приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра проводится анализ размеров какой-либо неоднородности на сформированной двумерной плоскости «время измерения t – расстояние от лидара R». Для этого на плоскости «время измерения – расстояние от лидара» выделяют неоднородность – односвязанную область, в пределах которой объемный коэффициент обратного рассеяния больше или меньше (на некоторое заданное пороговое значение, определяемое по данным математического моделирования или экспериментальным исследованиям) среднего значения объемного коэффициента обратного рассеяния. Пример такой неоднородности приведен на рис. 1.

Для выбранной неоднородности определяют (см. рис. 1): интервал времени $\Delta t = t_2 - t_1$; координаты начала и конца неоднородности (R_1, R_2); размер неоднородности $\delta R = \hat{R}_2 - \hat{R}_1$, соответствующий ее середине по временной оси $t_1 + \Delta t / 2$.

Приближенную оценку величины продольной мгновенной скорости $V_{\parallel}$ можно получить из соотношения $V_{\parallel} = (\Delta R - \delta R) / \Delta t$, где $\Delta R = |R_2 - R_1|$. Направление продольной скорости ветра определяют по знаку разности

$R_2 - R_1$ (положительное значение этой разности соответствует направлению от лидара, отрицательное – направлению к лидару).

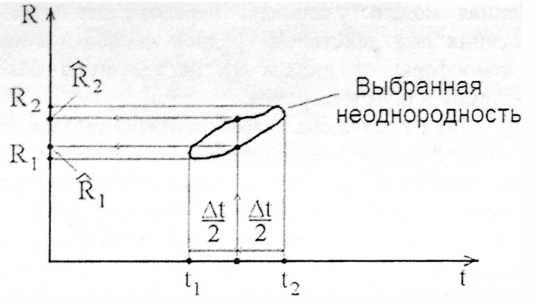

Рис. 1. Выбранная неоднородность на плоскости «время измерения – расстояние от лидара»

Приближенную оценку величины поперечной мгновенной скорости $V_\perp$ можно получить (полагая неоднородности изотропными) из соотношения $V_\perp = \delta R / \Delta t$. Направление поперечной скорости можно определить, используя, например, двухплощадочный фотоприемник.

Результаты математического моделирования и обработки экспериментальных данных показывают, что описанный метод позволяет проводить приближенное измерение скорости ветра с погрешностью 20 – 30% и направления ветра с погрешностью 25 – 30°.

Далее в главе рассмотрен вопрос о выборе размера измерительной базы для точного измерения мгновенной скорости и направления ветра.

В работах посвященных лазерным корреляционным методам измерения скорости и направления ветра даются рекомендации по выбору размера измерительной базы ξ_0 для временного корреляционного анализа: ее рекомендуют выбирать равной размеру неоднородностей. Однако, этот вывод был сделан для больших времен проведения измерений, когда необходимо учитывать временную эволюцию неоднородностей. В случае измерения мгновенной скорости ветра, когда время измерения, как правило, меньше характерного времени жизни неоднородностей (т.е. временной эволюцией неоднородностей можно пренебречь) вопрос о выборе измерительной базы остается не ясным.

В диссертации сначала рассмотрен случай (имеющий в большей степени методическое значение), когда направление ветра известно. Тогда единственным неизвестным параметром является скорость ветра. В данном случае измерительная база должна располагаться вдоль направления ветра. На рис. 2 показана (вид сверху) схема расположения исследуемых объемов атмосферы, облучаемых короткими импульсами сканирующего (в пределах

небольшого угла) в горизонтальной плоскости лазерного пучка, позволяющая проводить измерения в произвольной точке трассы зондирования и осуществлять выбор необходимого размера измерительной базы.

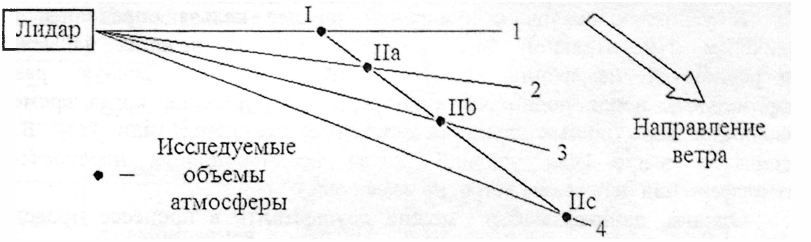

Рис. 2. Схема расположения исследуемых объемов атмосферы при известном направления ветра

На этом рисунке 1, 2, 3, 4,… – положения оптической оси лидара при сканировании; I – положение первой точки измерительной базы; IIa, IIb, IIc – возможные положения второй точки измерительной базы.

Для определения оптимального размера измерительной базы в условиях, когда время жизни неоднородностей больше времени проведения измерения, было проведено математическое моделирование и исследовалась зависимость погрешности измерения скорости ветра от размера измерительной базы.

На рис. 3 представлены результаты математического моделирования – зависимость средней абсолютной погрешности измерения скорости ветра ΔV от размера измерительной базы ξ_0 для разных скоростей ветра (2 м/с и 6 м/с) при размере неоднородностей $a=5$ м, отношении сигнал/шум равным двум, времени измерения 5 с и частоте повторения лазерных импульсов 500 Гц.

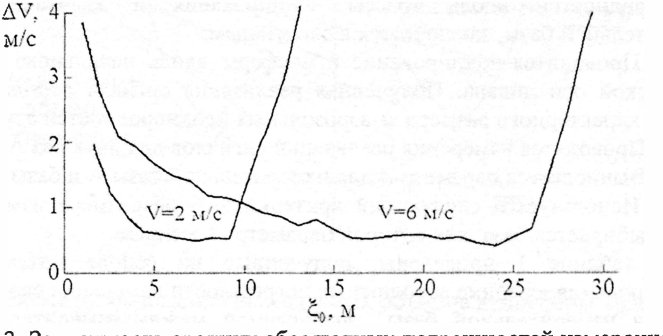

Рис. 3. Зависимость средних абсолютных погрешностей измерения мгновенной скорости ветра ΔV от величины измерительной базы ξ_0

Из рис. 3 видно, что наименьшие погрешности измерения скорости ветра достигаются при разных (в зависимости от скорости ветра) значениях измерительной базы: для скорости $V=2$ м/с – от 6 до 8 м для скорости ветра $V=6$ м/с – от 15 до 24 м. Таким образом, размер оптимальной измерительной базы зависит от диапазона измеряемых скоростей.

В условиях реальных измерений заранее нельзя определить какое значение измерительной базы выбирать для обеспечения наименьших погрешностей измерения скорости ветра: базу А, равную размеру аэрозольных неоднородностей атмосферы (для условий, когда временная эволюция аэрозольных неоднородностей существенна) или базу Б, как изложено выше (для условий, когда неоднородности переносятся в атмосфере под действием ветра, не изменяясь).

Однако, данный выбор можно осуществить в процессе проведения измерений. Результаты проведенного математического моделирования позволяют найти критерий выбора оптимальной измерительной базы. Показано, что погрешности измерения мгновенной скорости ветра зависят от некоторого параметра $\Lambda = \Delta_{min}/\xi_0^{1/2}$, где Δ_{min} – минимальное значение структурной функции сигналов от двух исследуемых объемов, разнесенных на измерительную базу:

$$\Delta_{\min} = \min_{\tau}\left(\frac{1}{T_0 f_л - \tau}\sum_{i=0}^{T_0 f_л - \tau}\left(P_{i+\tau}^{I} - P_i^{II}\right)^2\right), \qquad (3)$$

где P_i^I и P_i^{II} – сигналы от двух рассеивающих объемов (I, II) измерительной базы ,T_0 – время измерения, $f_л$ – частота посылки лазерных импульсов для каждого положения оптической оси, τ – аргумент структурной функции, при котором функция принимает минимальное значение.

Выбор базы, для которой параметр Λ меньше, обеспечивает меньшие ошибки измерения.

Метод измерения мгновенной скорости ветра, направление которого известно, основанный на оперативном определении размера аэрозольных неоднородностей вдоль трассы зондирования и адаптации размера измерительной базы, заключается в следующем:

1. Проводится зондирование атмосферы вдоль начального положения оптической оси лидара. Полученная реализация сигнала используется для оценки характерного размера a аэрозольных неоднородностей атмосферы.

2. Проводятся измерения реализаций сигналов для двух баз А и Б.

3. Вычисляется параметр Λ для измерительной базы А и базы Б.

4. Используется следующий критерий выбора размера измерительной базы: выбирается база, для которой параметр Λ меньше.

В таблице 1 приведены, полученные на основе математического моделирования, средние абсолютные погрешности измерения скорости ветра ΔV для измерительной базы выбираемой между измерительной базой равной размеру неоднородностей и измерительной базой равной 17 м (оптимальной для скоростей ветра 4…5 м/с, наиболее вероятных для средней

полосы). Размер неоднородностей $a=5$ м, время измерения $T_{изм}=5$ с, частота повторения лазерных импульсов $f=500$ Гц.

Таблица 1. Погрешности измерения мгновенной скорости ветра при известном направлении ветра

Сигнал/ шум	Измерительная база	V, м/с				
		2	4	6	8	10
2	ξ_0=a	0,5	1,0	1,9	2,3	2,7
	ξ_0-выбираемая	0,5	0,6	0,5	0,9	1,4
5	ξ_0=a	0,2	0,3	0,5	0,6	0,6
	ξ_0-выбираемая	0,2	0,1	0,1	0,3	0,4
10	ξ_0=a	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
	ξ_0-выбираемая	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Анализ результатов приведенных в таблице 1 показывает преимущество выбора одного из двух значений размера измерительной базы по сравнению с использованием измерительной базы равной размеру неоднородностей. Преимущество особенно существенно при малых значениях отношения сигнал/шум и достигает величины 1,3 м/с при больших скоростях ветра.

В большинстве практический приложений направление ветра неизвестно и его надо определять совместно со скоростью ветра, что значительно усложняет задачу.

Одна из схем, которая может обеспечить одновременное измерение мгновенной скорости и направления ветра, представлена на рис. 4 (вид сверху).

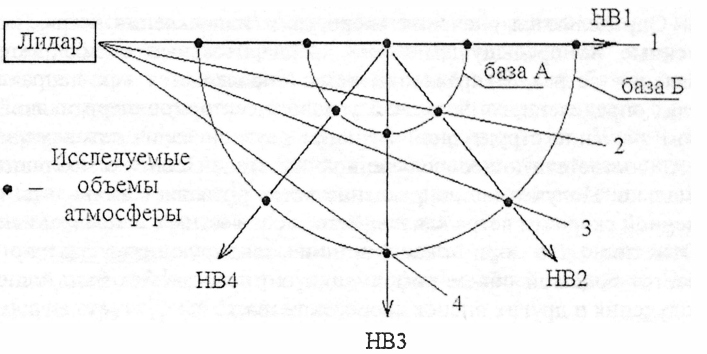

Рис. 4. Схема расположения исследуемых объемов атмосферы при неизвестном направления ветра

На данном рисунке 1, 2, 3, 4,… – положения оптической оси лидара при сканировании; НВ1, НВ2, НВ3, … – направления измерительных баз (их число определяется требуемой точностью измерения направления ветра, в диссертации на основе математического моделирования показано, что угловое расстоянием между последующими НВ в 10° обеспечивает приемлемые погрешности измерений). Для каждого направления измерительной базы выделяют две измерительные базы по выше описанной методике (для случая, когда направление ветра известно).

Метод измерения величины мгновенной скорости и направления ветра с адаптацией размера измерительной базы по данным оперативного измерения размера аэрозольных неоднородностей атмосферы вдоль трассы зондирования заключается в следующем (он в целом аналогичен методу при известном направлении ветра, но содержит этап предварительной оценки скорости и направлении ветра):

1. Проводится зондирование атмосферы вдоль начального положения оптической оси лидара. Полученная реализация сигнала используется для оценки характерного размера a аэрозольных неоднородностей атмосферы.

2. Проводятся измерения реализаций сигналов для баз А и Б.

3. Производится предварительная оценка скорости и направления ветра. Отслеживая перемещения неоднородностей через лазерные лучи 1, 2, 3, 4,…(см. рис.4), можно определить как приближенное направление ветра, так и предварительную приближенную оценку направления ветра, которая заключается в том, что бы определить угловой сектор направлений ветра с угловым размером 90°.

Оценка скорости и направления ветра на первом этапе позволяет исключить грубые ошибки и уменьшить погрешности измерения на следующем этапе.

4. Определяются значения скорости и направления ветра (используя полученные на предыдущем этапе предварительные оценки скорости и направления ветра). Направление ветра определяется как направление (в пределах определенного на этапе 3 углового сектора) измерительной базы, в котором значение структурной функции двух сигналов для измерительной базы А, соответствующее полученной на этапе 3 оценке скорости ветра, минимально. Полученное направление ветра позволяет вычислить значение мгновенной скорости ветра как для метода с известным направлением ветра.

Отметим, что при сканировании зондирующего лазерного луча получается большой объем информации, который может быть использован для получения и других оценок скорости ветра.

В таблице 2 приведены усредненные абсолютные погрешности измерения скорости ΔV и направления ветра $\Delta\alpha$ для $a=5$ м, $T_{изм}=5$ с и $f=500$ Гц. Так же в таблице 2 приведены погрешности измерения скорости ΔV для случая $\xi_0=a$, когда размер измерительной базы равен размеру неоднородностей для всех направлений измерительных баз (погрешности $\Delta\alpha$

для $\xi_0=a$ совпадают с $\Delta\alpha$ для метода с адаптивным изменением величины измерительной базы).

Таблица 2. Погрешности измерения скорости и направления ветра при неизвестном направлении ветра

Сигнал /шум	Метод измерения	Погреш-ность	V, м/с			
			4	6	8	10
2	ξ_0=a	ΔV, м/с	1,3	1,9	2,6	3,3
	ξ_0-выбираемая	ΔV, м/с	0,7	0,9	1,2	1,4
		Δα, °	17	16	15	13
5	ξ_0=a	ΔV, м/с	0,8	1,0	1,4	1,7
	ξ_0-выбираемая	ΔV, м/с	0,6	0,8	0,9	1,0
		Δα, °	15	15	11	12
10	ξ_0=a	ΔV, м/с	0,7	0,8	1,2	1,1
	ξ_0-выбираемая	ΔV, м/с	0,6	0,7	0,8	0,7
		Δα, °	14	13	13	9

Из таблицы 2 видно, что метод измерения величины мгновенной скорости и направления ветра с адаптацией размера измерительной базой позволяет получать средние относительные погрешности измерения от 5% до 20% для скорости и средние абсолютные погрешности от 5° до 20° для направления ветра, в зависимости от отношения сигнал/шум и величины скорости ветра, и позволяет уменьшить погрешность измерения скорости ветра на 0,1…1,9 м/с по сравнению с методом, использующим измерительную базу равную размеру неоднородностей.

По сравнению с известным временным корреляционным методом разработанный метод измерения величины мгновенной скорости и направления ветра с адаптацией размера измерительной базой позволяет уменьшить погрешность определения мгновенной скорости ветра при малом отношении сигнал/шум (сигнал/шум равным двум) на 30% и на 30° погрешность измерения направления. При большом отношении сигнал/шум (сигнал/шум равным десяти) уменьшение погрешности измерения составляет 10 % для скорости и 10° для направления ветра.

В пятой главе описаны созданный макет для натурных измерений мгновенной скорости ветра и результаты полученных измерений. На рис. 5 представлена структурная схема макета.

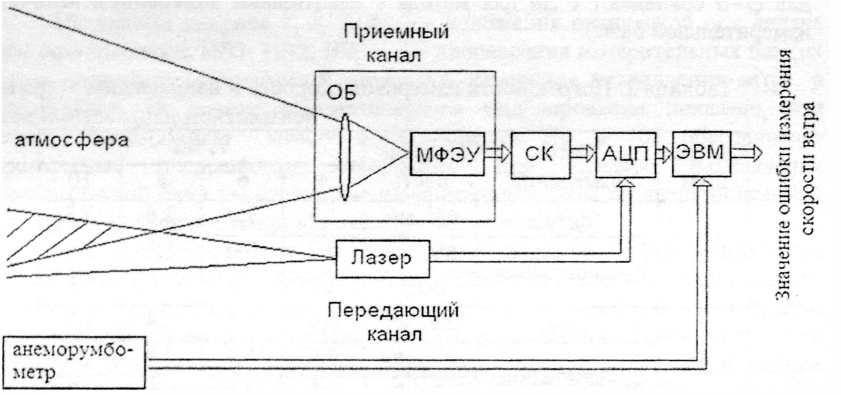

Рис. 5. Структурная схема макета для измерения мгновенной скорости ветра

В качестве лазера использовался твердотельный лазер YAG:Nd с диодной накачкой и с удвоением частоты. Лазер генерировал импульсы с длительностью 7 нс на длине волны 532 нм, энергией в импульсе 2 мДж и частотой повторения до 500 Гц. Рассеянное атмосферой лазерное излучение фокусировалось с помощью объектива ОБ на модуле ФЭУ (МФЭУ). В макете использовался интерференционный фильтр со спектральной шириной 1 нм. Сигнал с МФЭУ поступал на АЦП и далее в ЭВМ (в ЭВМ поступали также данные с анеморумбометра). Для согласования нагрузки ФЭУ и АЦП, а так же усиления, использовался согласующий каскад СК, в качестве которого использовался трансимпедансный усилитель. В созданном макете не было реализовано пространственное сканирование лазерного луча.

На рис. 6 представлена фотография внешнего вида созданного макета.

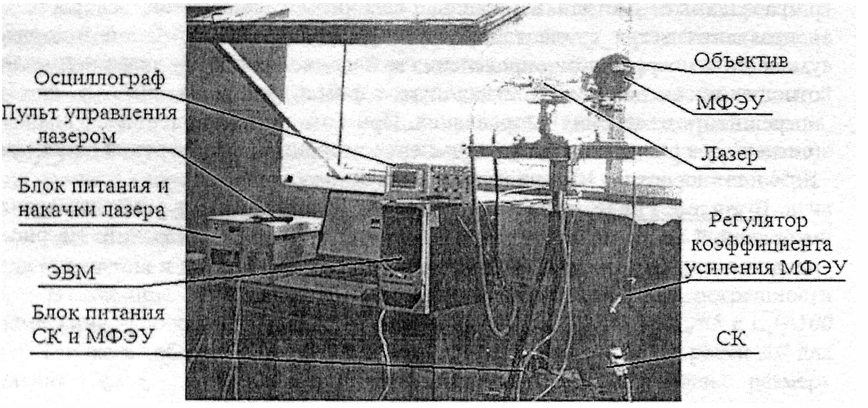

Рис. 6. Макет лазерного измерителя мгновенной скорости ветра

Измерения проводились в летне-осенний период на базе филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в Дмитровском районе Московской области при различных метеоусловиях.

В ходе натурных экспериментов проводилось измерение величины мгновенной скорости и направления ветра с использованием однолучевого, не требующего пространственного сканирования, метода приближенного измерения величины мгновенной скорости и направления ветра. На рис. 7 показан пример экспериментально измеренного двумерного поля относительных флуктуаций (в процентах) объемного коэффициента обратного рассеяния, которое используется для данного метода.

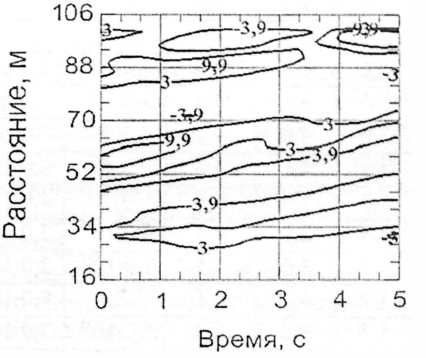

Рис. 7. Экспериментально измеренное двумерное поле относительных флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеяния

Результаты обработки натурных измерений показали, что погрешность измерения (по отношению к показаниям анеморумбометра) данным методом составляет в среднем величину порядка 20 – 30% для скорости и 20 – 30° для направления ветра, что соответствует данным математического моделирования, приведенным в главе 4.

В таблице 3 приведены примеры результатов измерений мгновенной скорости ветра в окрестности анеморумбометра методом с адаптацией размера измерительной базы V_a для 14 различных измерений (проведенных в разное время, при разных метеоусловиях). Время измерения равнялось 5 с.

В первой колонке приведен порядковый номер измерения; во второй – размер a аэрозольных неоднородностей атмосферы; в третьей колонке – скорость ветра $V_{анем}$ по показаниям анеморумбометра; в четвертой и пятой колонках соответственно – измеренная скорость ветра для измерительной базы ξ_0, равной размеру неоднородностей a и базы равной 17 м. В шестой и седьмой колонках – значение критерия Λ для измерительной базы ξ_0, равной размеру неоднородностей a и равной 17 м, соответственно. В восьмой – значение скорости ветра, измеренной с помощью метода с адаптацией

размера измерительной базы, т. е. в соответствии с минимальным значением критерия Λ.

Таблица 3. Результаты экспериментального измерения мгновенной скорости ветра

№	a, м	$V_{анем}$, м/с	V, м/с		Λ		V_a, м/с
			$\xi_0=a$	$\xi_0=17$ м	$\xi_0=a$	$\xi_0=17$ м	
1	7,5	2,5	2,9	0,5	$7{,}0\cdot10^{-2}$	1,7	2,9
2	6,0	2,0	2,1	6,1	$4{,}0\cdot10^{-2}$	$1{,}5\cdot10^{-1}$	2,1
3	4,5	2,1	2,2	4,3	$3{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}0\cdot10^{-2}$	2,2
4	4,5	2,1	1,2	4,9	$4{,}0\cdot10^{-3}$	$7{,}0\cdot10^{-3}$	1,2
5	6,0	3,0	3,1	4,2	$3{,}0\cdot10^{-1}$	7,0	3,1
6	4,5	3,0	4,0	4,2	1,8	2,5	4,0
7	4,5	4,5	4,6	4,6	3,0	$6{,}0\cdot10^{-1}$	4,6
8	4,5	4,5	1,4	4,9	3,7	$4{,}0\cdot10^{-1}$	4,9
9	6,0	4,5	2,9	4,3	$9{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-2}$	4,3
10	6,0	4,5	3,0	1,5	$1{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-2}$	3,0
11	4,5	5,7	4,9	6,1	2,2	$8{,}0\cdot10^{-1}$	6,1
12	4,5	5,7	5,0	5,5	$5{,}0\cdot10^{-1}$	$7{,}0\cdot10^{-2}$	5,5
13	6,0	6,7	8,7	8,1	$3{,}0\cdot10^{-1}$	$7{,}0\cdot10^{-2}$	8,1
14	6,0	6,7	3,8	5,4	$2{,}0\cdot10^{-2}$	$1{,}0\cdot10^{-2}$	5,4

Из таблицы 3 видно, что по величине критерия Λ можно судить о погрешностях измерения скорости ветра ΔV: база с меньшим значением критерия Λ обеспечивает меньшие погрешности измерения скорости ветра. Метод измерения величины мгновенной скорости ветра с адаптацией размера измерительной базы позволяет уменьшить (по сравнению с методом, использующим измерительную базу равную размеру неоднородностей) погрешность измерения мгновенной скорости ветра в среднем на 6% для небольших скоростей ветра (меньше 4 м/с) и на 17% для больших скоростей ветра (больше 4 м/с) и обеспечивает возможность измерения мгновенной скорости ветра со средней относительной погрешностью 15%.

Таким образом, результаты математического моделирования и экспериментов показывают, что оперативное измерение размера аэрозольных неоднородностей и адаптация размера измерительной базы в соответствии с найденным критерием позволяют уменьшить погрешность определения мгновенной скорости ветра корреляционными лидарами и получать приемлемые погрешности измерения даже при малых отношениях сигнал/шум.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан метод измерения величины мгновенной скорости и направления ветра с адаптацией размера измерительной базы по данным оперативного измерения размера аэрозольных неоднородностей атмосферы вдоль трассы зондирования, позволяющий проводить измерения даже при малом отношении сигнал/шум и использующий пространственное сканирование атмосферы одним лазерным лучом.
2. Предложен критерий выбора величины измерительной базы, которая обеспечивает минимальные погрешности измерений при использовании временного корреляционного метода измерения скорости ветра.
3. Метод измерения величины мгновенной скорости и направления ветра с адаптацией размера измерительной базы позволяет получать средние относительные погрешности измерения от 5% до 20% для скорости и средние абсолютные погрешности от 5° до 20° для направления ветра, в зависимости от отношения сигнал/шум и величины скорости ветра, и позволяет уменьшить погрешность измерения скорости ветра на 0,1…1,9 м/с по сравнению с методом, использующим измерительную базу равную размеру неоднородностей.
4. Разработан однолучевой не требующий пространственного сканирования метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра, позволяющий получать оценку мгновенной скорости ветра с погрешностью 20 – 30% по скорости и 25 – 30° по направлению ветра.
5. Результаты экспериментальных исследований на созданном макете лазерного измерителя показали, что метод измерения мгновенной скорости ветра с адаптивной измерительной базой позволяет измерять мгновенную скорость ветра со средней относительной погрешностью 15%.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Способ оперативного дистанционного определения скорости и направления ветра: пат. 2404435 РФ / М.Л. Белов, В.А. Городничев, С.Е. Иванов, В.И. Козинцев, заяв. 04.06.09, опубл. 20.11.10, Бюлл. №32.

2. Лазерный метод оперативного измерения скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы / В.И. Козинцев [и др.] // Вестник МГТУ им. Баумана. Приборостроение. – 2009. – Спец. Выпуск: Антенны и устройства радио-оптического диапазонов. – С. 232-236.

3. Лазерный метод оперативного измерения скорости и направления ветра/ В.И. Козинцев [и др.] // Вестник МГТУ им. Баумана. Приборостроение. – 2011. – №1. – С. 57-66.

4. Лазерный дистанционный метод оценки мгновенной скорости и направления ветра / В.И. Козинцев [и др.] // Вестник МГТУ им. Баумана. Приборостроение. – 2011. – Спец. Выпуск: Современные проблемы оптотехники. – С. 70-77.

5. Экспериментальные исследования оперативного метода измерения скорости ветра с адаптивным выбором измерительной базы / В. И. Козинцев [и др.] // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2012. – №2.- С.79-86.

6. Корреляционный лазерный метод с адаптивным выбором измерительной базы для оперативного измерения скорости ветра / Козинцев В.И. [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 2. – С. 165-170.

7. Белов М.Л., Иванов С.Е., Козинцев В.И. Математическое моделирование работы корреляционного лидара для оперативного измерения скорости ветра // Медико-технические технологии на страже здоровья: 10-я Международная научно-техническая конференция. – М., 2008. – С. 44-45.

8. Белов М.Л., Иванов С.Е., Козинцев В.И. Лидарный метод оперативного измерения скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы // Медико-технические технологии на страже здоровья: 11-я Международная научно-техническая конференция. – М., 2009. – С. 89-90.

9. Лазерный метод оперативного измерения скорости и направления ветра вдоль наклонных трасс / С.Е. Иванов [и др.] // Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения: Всероссийская научно-технической конференции. – Воронеж, 2009. – С. 121-124.

10. Экспериментальное исследование макета корреляционного лидара для оперативного измерения скорости атмосферного ветра / С.Е. Иванов [и др.] // Медико-технические технологии на страже здоровья: 12-я Международная научно-техническая конференция. – М., 2010. – С. 81-82.

11. Адаптивный лидарный метод оперативного измерения скорости ветра в атмосфере / В.И. Козинцев [и др.] // Медико-технические технологии на страже здоровья: 12-я Международная научно-техническая конференция. – М., 2010. – С. 82-84.

12. Лидарный метод оперативной оценки направления и скорости ветра в атмосфере / С.Е. Иванов [и др.] // Медико-технические технологии на страже здоровья: 13-я Международная научно-техническая конференция. – М., 2011. – С. 65-66.

13. Лазерный метод измерения мгновенной скорости и направления ветра в приземном слое атмосфере / В.И. Козинцев [и др.] // Медико-технические технологии на страже здоровья: 13-я Международная научно-техническая конференция. М., 2011. С. 69-70.

14. Экспериментальные исследования лидарного метода оперативной оценки направления и скорости ветра в атмосфере / В.И. Козинцев [и др.] // Медико-технические технологии на страже здоровья: 13-я Международная научно-техническая конференция. – М., 2011. – С. 74-75.