

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.521

Корреляционный лазерный метод с адаптивным выбором измерительной базы для оперативного измерения скорости ветра

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

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
НИИ радиоэлектроники и лазерной техники
107005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5*

Поступила в редакцию 28.01.2011 г.

Рассмотрен оперативный лазерный метод определения скорости ветра в атмосфере, использующий временной корреляционный анализ. 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.

Ключевые слова: корреляционный лазерный метод, измерительная база, скорость ветра; correlation laser method, measuring base, wind velocity.

Введение

Для многих практических приложений наиболее перспективными дистанционными методами измерения скорости ветра являются лазерные (хотя возможности лазерных методов не перекрывают напрямую возможностей радиолокационных методов). Необходимость оперативного (единицы секунд) измерения требует развития существующих лазерных методов измерения скорости и направления атмосферного ветра.

Дистанционные лазерные методы измерения скорости ветра разделяются на доплеровские и корреляционные. Недостатком доплеровских лазерных методов является их способность измерять только продольную составляющую скорости ветра. Полный вектор скорости ветра можно восстановить по данным измерений продольной скорости при угловом сканировании. При этом для увеличения точности определения поперечной скорости ветра необходим большой угол сканирования, что приводит к большому пространственному усреднению, т.е. невозможности использовать доплеровские лазерные методы при сложном профиле скорости ветра (хотя в более простых задачах, например в качестве аэродромных лидаров, широко используются доплеровские лазерные системы).

Более простыми и требующими менее дорогую аппаратуру являются корреляционные методы [1, 2].

* Валентин Иванович Козинцев; Сергей Евгеньевич Иванов (ekomonit@bmstu.ru); Михаил Леонидович Белов (ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru); Виктор Александрович Городничев.

Хотя они обеспечивают меньшую дальность зондирования (по сравнению с доплеровскими), но являются наиболее подходящими для ряда практических приложений. Узкий луч корреляционного ветрового лидара можно направлять близко от поверхности или других особенностей рельефа. Лазерные корреляционные системы являются единственными, которые позволяют проводить (пусть и с ошибками) дистанционные оперативные измерения пространственного распределения скорости и направления ветра при сложном профиле скорости ветра, например в условиях сложного рельефа местности.

Теоретическому и экспериментальному исследованию лазерных корреляционных систем и смежных вопросов посвящено множество публикаций (см., например, [1–8]). В большинстве случаев ветровые корреляционные лидары используют времена накопления информации единицы и десятки минут. Во многих приложениях необходима более высокая оперативность получения значений скорости ветра (единицы секунд). Лидарные методы могут обеспечить необходимое сокращение времени накопления информации. При этом естественный путь заключается в использовании лидаров с малой измерительной базой [1–3]. Однако точность измерения скорости ветра в этом случае сильно зависит от размеров базы, размера аэрозольных неоднородностей атмосферы и отношения сигнал-шум.

Ниже описывается метод, позволяющий увеличить точность оперативного определения скорости ветра. Метод использует временной корреляционный анализ, оперативное измерение размера аэрозольных неоднородностей вдоль трассы зондирования и адаптивное изменение размера измерительной базы по

данным этих измерений (чтобы сделать измерительную базу оптимальной с точки зрения минимизации погрешностей определения скорости ветра).

Выбор оптимального размера ξ_0 измерительной базы для корреляционного метода измерения скорости ветра обсуждался, например, в [1]. Показано, что оптимальным является выбор ξ_0 порядка размера d аэрозольных неоднородностей атмосферы. Однако этот вывод был сделан для достаточно больших времен наблюдения, когда аэрозольные неоднородности могут разрушаться и, пройдя первую точку измерительной базы, не дойти до второй точки измерительной базы (при большом размере ξ_0).

Вопрос о выборе оптимального размера измерительной базы в условиях оперативных измерений (когда время измерения мало — единицы секунд) остается неясным. При малом времени измерения аэрозольные неоднородности атмосферы в большинстве случаев не успевают разрушаться [1], проходя от первой до второй точки измерительной базы (для малой измерительной базы). В этом случае оптимальный размер измерительной базы должен определяться не только размером аэрозольных неоднородностей, но и временем наблюдения, требуемой минимальной измеряемой скоростью ветра и отношением сигнал-шум. При этом необходимо предварительное зондирование атмосферы для оперативной оценки характеристик аэрозольных неоднородностей вдоль трассы зондирования, поскольку сами размеры аэрозольных неоднородностей атмосферы (и время их жизни) изменяются в широком диапазоне в зависимости от атмосферных условий [1].

Рассмотрим сначала случай, когда направление ветра известно. Тогда единственным параметром, который надо определить, является скорость ветра.

На рис. 1 показана геометрическая схема измерений (в произвольной точке трассы зондирования) корреляционного ветрового лидара с короткими зондирующими импульсами и сканирующим в горизонтальной плоскости лазерным пучком.

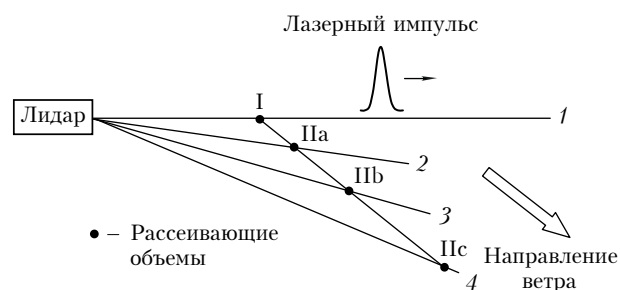


Рис. 1. Геометрическая схема измерений для случая, когда направление ветра известно. Прямые 1, 2, 3, 4, ... — положения оптической оси лидара при сканировании; I — положение первой точки измерительной базы; IIa, IIb, IIc — возможные положения второй точки измерительной базы

Данная схема позволяет проводить оперативные измерения горизонтальной скорости ветра в произвольной точке трассы зондирования.

Лидар облучает атмосферу узким лазерным пучком, сканирующим в горизонтальной плоскости в пре-

делах некоторого небольшого угла сканирования (порядка единиц градусов).

При положении 1 оптической оси лидара регистрируется временная реализация обратно рассеянного сигнала (для одного или нескольких первых лазерных импульсов, посылаемых в атмосферу; в заданном диапазоне расстояний от лидара или насколько хватает энергетического потенциала лидара). Зная временную реализацию обратно рассеянного сигнала, можно восстановить реализацию коэффициента обратного рассеяния, далее оценить радиус корреляции коэффициента обратного рассеяния и характерный пространственный размер неоднородностей коэффициента обратного рассеяния (считая неоднородности изотропными [1]).

Лазерный импульс (для каждого положения оптической оси лидара при сканировании) рассеивается на атмосферном аэрозоле и поступает в приемную систему лидара. При известном направлении ветра (НВ) измерительная база должна располагаться вдоль этого направления [1]. Пусть первая точка измерительной базы находится в точке I. Тогда вторая точка измерительной базы должна находиться на линии НВ на некотором оптимальном (с точки зрения минимизации погрешностей измерения скорости ветра) расстоянии от точки I (в одной из точек IIa, IIb, IIc).

Для определения оптимального размера измерительной базы проводилось математическое моделирование и исследовалась зависимость погрешности измерения скорости ветра от размера измерительной базы.

Для математического моделирования был создан комплекс программ, имитирующий работу лазерного измерителя скорости атмосферного ветра. Комплекс включает в себя блок моделирования двумерных полей аэрозольных неоднородностей, блок расчета принимаемых сигналов от зондируемых объемов атмосферы при наличии шума измерения и блок обработки сигналов, реализующий временной корреляционный метод измерения скорости ветра.

Автокорреляционная функция пространственного распределения объемного коэффициента обратного рассеяния задавалась гауссовской. Для моделирования двумерных полей объемного коэффициента обратного рассеяния использовался метод формирующего фильтра (заданная автокорреляционная функция используется для расчета передаточной функции формирующего фильтра).

Коэффициент вариации объемного коэффициента обратного рассеяния полагался (для результатов, приведенных в статье) равным 0,1 [1]. Неоднородности считались изотропными, и их размеры выбирались из диапазона 1–10 м [1]. При математическом моделировании использовались различные варианты задания размеров аэрозольных неоднородностей: размер мог быть равным 5 м, выбираться (равновероятно) из диапазона 3–8 м (или выбираться из меньшего диапазона). Среднее значение объемного коэффициента обратного рассеяния задавалось (для результатов, приведенных в статье) равным $0,06 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ [9].

При математическом моделировании не рассматривались флуктуации скорости ветра, т.е. во время всего измерения (единицы секунд) скорость и направление ветра полагались постоянными. Считалось, что аэрозольные неоднородности, не изменяясь, переносятся в атмосфере под действием ветра. В этом случае временной корреляционный метод определения скорости ветра V может быть очень упрощен [1]:

$$V = \xi_0 / \tau,$$

где ξ_0 — измерительная база; τ — временной сдвиг корреляционной функции двух сигналов, регистрируемых от рассеивающих объемов атмосферы в точках I и II.

При проведении моделирования для определения τ была использована структурная функция сигналов (временной сдвиг τ соответствовал минимуму структурной функции двух сигналов, регистрируемых от рассеивающих объемов атмосферы в точках I и II).

Математическое моделирование проводилось при различном времени измерения для разных размеров аэрозольных неоднородностей атмосферы, различном отношении сигнал-шум (шум считался «белым», распределенным по нормальному закону со средним значением, равным нулю, и заданной дисперсией) в широком диапазоне скоростей ветра. Задаваемые при математическом моделировании параметры атмосферных неоднородностей соответствовали условиям приземного слоя атмосферы.

На рис. 2 для примера представлены зависимости средних (по 500 реализациям полей аэрозольных неоднородностей атмосферы) модулей погрешностей измерения скорости ветра ΔV от величины измерительной базы ξ_0 (измерительная база вдоль направления ветра) для размера аэрозольных неоднородностей $d = 5$ м и отношения сигнал-шум, равного 5. Время измерения 5 с. Частота повторения лазерных импульсов принималась равной 200 Гц.

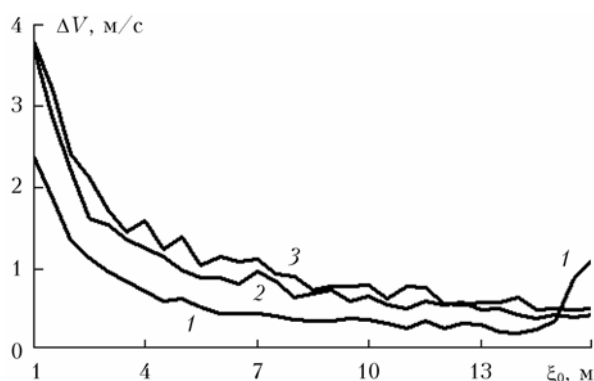


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения скорости ветра от величины измерительной базы: $V = 4$ (1), 8 (2), 12 м/с (3)

Результаты математического моделирования показывают, что в общем случае на оптимальный (с точки зрения минимизации погрешностей измерения скорости ветра) размер измерительной базы влияет мно-

го факторов. Причем, с одной стороны, при небольших ξ_0 увеличение базы приводит к уменьшению погрешности измерений скорости ветра. С другой стороны, при больших ξ_0 и ограниченном времени наблюдения увеличение базы приводит к уменьшению общего «перекрытия» сигналов, регистрируемых в точках I и II измерительной базы, и к увеличению погрешности измерения скорости ветра. Из рис. 2 видно, что наименьшие погрешности измерения скорости ветра получаются (для условий, при которых проводились расчеты, и минимальной измеряемой скорости ветра 4 м/с) при выборе измерительной базы $\xi_0 \sim 14$ м.

Выбор необходимого размера измерительной базы при произвольном (известном) направлении ветра обеспечивается возможностью локализации в пространстве объемов измерения в точках I и II за счет углового сканирования узкого лазерного пучка и использования лазера с короткими зондирующими импульсами.

В условиях реальных оперативных измерений время жизни аэрозольных неоднородностей неизвестно, поэтому заранее нельзя определить, какую измерительную базу лучше (в смысле обеспечения наименьших погрешностей измерения скорости ветра) использовать: базу, выбранную для условий, когда неоднородности переносятся в атмосфере под действием ветра, не изменяясь (вариант А), или базу, равную размеру d аэрозольных неоднородностей атмосферы, для условий, когда временная эволюция аэрозольных неоднородностей существенна (вариант Б).

Однако этот вопрос можно решить в процессе проведения измерений. Результаты проведенного математического моделирования показывают, что погрешности измерения скорости ветра зависят от некоторого параметра

$$\Lambda = \Delta_{\min} / \xi_0^{1/2},$$

где Δ_{\min} — минимальное значение структурной функции реализаций сигналов, измеренных в точках I и II (т.е. значение структурной функции при наилучшем совмещении реализаций сигналов, для которого определяется временной сдвиг, используемый для измерения скорости ветра). Отметим, что выбор конкретного вида параметра Λ являлся эвристическим. При его выборе (вернее, построении) учитывалось, что параметр Λ должен зависеть от погрешности нахождения положения минимума структурной функции (так как это положение определяет измеренную скорость ветра и, соответственно, погрешность нахождения этого положения определяет погрешность измерения скорости ветра). Косвенно о погрешности определения положения минимума структурной функции говорит минимальное значение структурной функции (реализаций сигналов при наилучшем их совмещении). Поэтому параметр Λ должен быть прямо пропорционален Δ_{\min} .

Математическое моделирование показывает: чем больше измерительная база ξ_0 , тем меньше погрешности измерения (конечно, если аэрозольные неоднородности не разрушаются и доходят из точки I

измерительной базы до точки II). Поэтому параметр Λ должен быть обратно пропорционален размеру измерительной базы ξ_0 . При этом степень $1/2$ (в которой ξ_0 стоит в знаменателе выражения для параметра Λ) подбиралась по результатам математического моделирования.

Методика адаптивного выбора измерительной базы при оперативном измерении скорости ветра может быть следующей:

1. Проводится зондирование атмосферы вдоль начального положения l оптической оси лидара. Полученная реализация сигнала (она определяется пространственной реализацией коэффициента обратного рассеяния атмосферы вдоль трассы l) используется для оценки характерного размера d аэрозольных неоднородностей атмосферы.

2. Проводятся измерения (см. рис. 1) реализаций сигналов для вариантов А и Б измерительной базы.

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

4. Для определения скорости ветра выбирается измерительная база, для которой параметр Λ меньше.

В табл. 1 приведены результаты математического моделирования. Здесь показаны средние (по 500 реализациям полей аэрозольных неоднородностей атмосферы) модули погрешностей измерения скорости ветра ΔV для варианта А измерительной базы (равной 14 м) и измерительной базы Б (равной размеру неоднородностей) $d = 5$ м, в скобках даны значения параметра Λ .

Таблица 1

Погрешности измерения скорости ветра при известном направлении ветра

Сигнал-шум	Скорость ветра, м/с		
	4	8	12
$\xi_0 = 5$ м			
2	1,5 (1,92)	3,5 (2,10)	5,1 (2,19)
5	0,7 (0,36)	1,0 (0,40)	1,3 (0,41)
50	0,04 (0,005)	0,08 (0,007)	0,15 (0,009)
$\xi_0 = 14$ м			
2	1,0 (1,05)	1,6 (1,27)	3,0 (1,31)
5	0,3 (0,19)	0,4 (0,24)	0,6 (0,25)
50	0,03 (0,003)	0,04 (0,004)	0,07 (0,006)

Табл. 1 иллюстрирует преимущество выбора размера измерительной базы А при проведении оперативных измерений скорости ветра (в случае, когда неоднородности не разрушаются и переносятся в атмосферу под действием ветра). Видно, что в величине Λ можно судить о погрешностях измерения скорости ветра ΔV : база с меньшим Λ обеспечивает меньшие погрешности измерения скорости ветра.

Если направление ветра неизвестно, то его надо определять одновременно со скоростью ветра. Одна

из схем, которая может обеспечить оперативное измерение скорости и направления ветра, представлена на рис. 3 (состав аппаратуры здесь тот же, как и для рис. 1, но необходима гораздо более мощная ЭВМ).

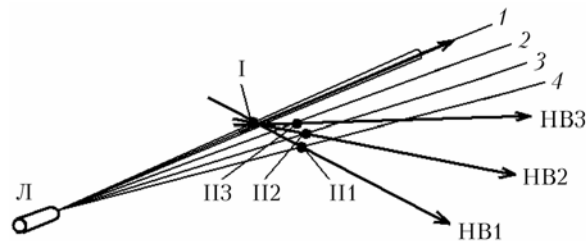


Рис. 3. Геометрическая схема измерений для случая, когда направление ветра неизвестно: Л — лидар; 1, 2, 3, 4, ... — положение оптической оси лидара при сканировании; NB1, NB2, NB3, ... — направления измерительных баз (их число определяется требуемой точностью измерения направления ветра)

Для каждого направления NB1, NB2, NB3, ... проводится цикл обработки результатов измерений, описанный выше. За направление ветра принимается направление, для которого реализуется самый меньший минимум структурных функций, построенных с использованием сигналов регистрируемых в точках I и II (II1 — для направления базы NB1, II2 — для направления базы NB2, ...) измерительных баз.

Методика проведения измерений при неизвестном направлении ветра требует использования сканирующего (в узком диапазоне углов — градусы) в горизонтальной плоскости лазерного пучка. Частота повторения импульсов лазера — единицы кГц или первые десятки кГц. Пространственное сканирование позволяет обеспечить формирование измерительных баз с направлениями NB1, NB2, NB3, Для каждого направления могут быть использованы варианты базы А и Б (см. выше). Для выбора наилучшего из них (с точки зрения погрешности измерений) используется описанный выше параметр Λ .

Результаты математического моделирования сравнивались с результатами натуральных измерений. Для измерения скорости ветра был создан макет корреляционного лидара. Для контроля скорости и направления атмосферного ветра в одной точке трассы использовался анеморумбометр.

В качестве лазера использовался твердотельный YAG:Nd-лазер с диодной накачкой и с удвоением частоты NL210, фирмы EKSPILA. Лазер генерировал короткие импульсы длительностью ~ 7 нс на длине волны 532 нм с энергией в импульсе 2 мДж и частотой повторения до 500 Гц. В приемном канале использовался интерференционный фильтр фирмы THORLABS FL-532-1 со спектральной шириной 1 нм (по уровню 0,5). В качестве фотоприемника оптического излучения использовался модуль ФЭУ фирмы HAMAMATSU H7826-01. Сигнал с ФЭУ поступал на АЦП (использовалось АЦП с разрядностью 12 бит) и далее в ЭВМ. Максимальная частота приемной регистрирующей аппаратуры составляла

~ 50 МГц. Для определения ошибки измерения скорости ветра в ЭВМ поступали данные с анеморумбометра.

Измерения проводились в осенне-летний период 2010 г. 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 в 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 созданном макете не было реализовано пространственное сканирование лазерного луча, поэтому результаты получены только для случая, когда оптическая ось лидара совпадала с направлением ветра.

На рис. 4 приведена экспериментально полученная структурная функция $D(\tau)$ регистрируемых сигналов, которая рассчитывалась по формуле

$$D(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \sum_{i=0}^{T-\tau} (P^I(t + \tau) - P^{II}(t))^2,$$

где $P^I(t)$ и $P^{II}(t)$ – реализации сигналов (предварительно сглаженные) от рассеивающих объемов (в точках I и II), разнесенных на измерительную базу; T – время измерения.

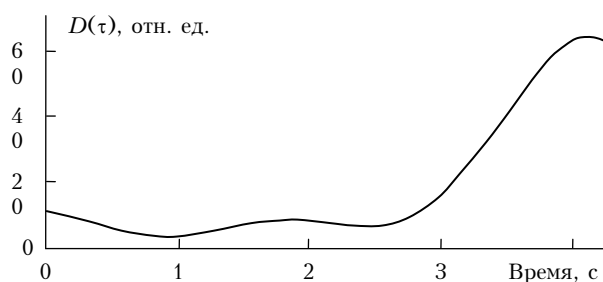


Рис. 4. Экспериментально полученная структурная функция регистрируемых сигналов

По оси абсцисс на рис. 4 отложен временной сдвиг между реализациями, измеренными в двух точках измерительной базы. Измерительная база равна среднему размеру неоднородностей (4,5 м по данным измерений). Приведенная структурная функция получена из экспериментальных данных при скользящем усреднении по 200 импульсам (при частоте повторения лазера в эксперименте 500 Гц). Измеренная скорость ветра (по минимуму структурной функции) составила 5 м/с, показания анеморумбометра во время этого измерения 4,5 м/с.

В табл. 2 приведены результаты измерений скорости ветра в точке, где находится анемометр, для 10 различных измерений, проведенных в разное время при разных метеорологических условиях.

Размер d аэрозольных неоднородностей атмосферы оценивался по результатам зондирования атмосферы вдоль оптической оси лидара, скорость ветра $V_{ан}$ – по показаниям анеморумбометра. Абсолютные значения ошибок измерения скорости ветра для измерительной базы, равной размеру неоднородностей

Погрешности измерения скорости ветра при натуральных экспериментах

№ измерения	d , м	$V_{ан}$, м/с	ΔV , м/с			Λ	
			$\xi_0 = d$	$\xi_0 = 9$ м	Адаптивно выбираемая база	$\xi_0 = d$	$\xi_0 = 9$ м
1	2	3	4	5	6	7	8
1	7,5	2,5	0,7	0,35	0,35	0,17	0,15
2	6	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	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	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	6,7	1,7	1,5	1,5	0,075	0,06

d , даны в четвертой колонке, базы, равной 9 м, – в пятой колонке. Размер ~ 9 м соответствует, согласно математическому моделированию, оптимальному размеру измерительной базы для времени наблюдения 5 с, минимальной измеряемой скорости ветра 2 м/с. Для измерительной базы, выбираемой в соответствии с минимумом параметра Λ , абсолютные значения ошибок приведены в шестой колонке (адаптивно выбираемая база). В седьмой и восьмой колонках приведены значения параметра Λ для измерительной базы, равной размеру неоднородностей d и 9 м соответственно.

Из табл. 2 видно, что для большинства измерений по величине параметра Λ действительно можно судить о погрешностях измерения скорости ветра ΔV : база с меньшим параметром Λ обеспечивает меньшие погрешности измерения скорости ветра. Исключение составляет только измерение № 2 для самой небольшой скорости ветра 2 м/с. Но здесь ошибки ΔV невелики (по абсолютной величине) и безразлично, какая измерительная база будет выбрана.

На рис. 5 приведены погрешности измерения скорости ветра в окрестности анеморумбометра для трех размеров измерительной базы: 1) база с постоянным значением 4,5 м, равным наиболее вероятному размеру неоднородностей (кривая 1); 2) база, равная размеру неоднородностей (кривая 2); 3) адаптивно выбираемая база (кривая 3).

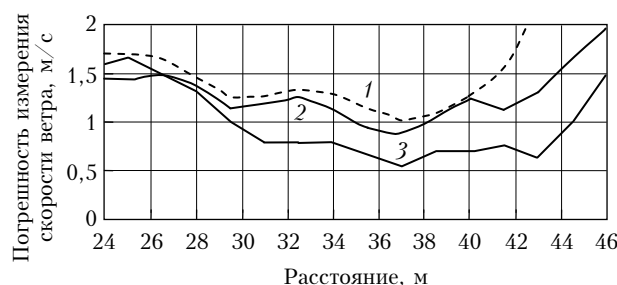


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения скорости ветра от расстояния до лидара

Погрешность измерения находилась как абсолютное значение разницы показаний анеморумбометра и измеренного значения скорости ветра. Расстояние (по оси абсцисс) отсчитывается от макета лидара. Измеренный пространственный профиль скорости ветра предварительно сглаживался. Значения погрешностей усреднены по 10 измерениям (см. табл. 2). Из рис. 5 видно, что адаптивный выбор измерительной базы позволяет заметно уменьшить погрешности измерения скорости ветра.

Таким образом, результаты математического моделирования и экспериментов показывают, 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.

1. *Корреляционные* методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Задде, Э.С. Фердинандов, И.Н. Колев, Р.П. Аврамова. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.
2. *Применение* корреляционных методов в атмосферной оптике / В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов, Н.И. Юрга, М.Л. Белов, А.Ф. Овчаренко. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.

3. Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В., Рыбалко В.С., Борцов Ю.Н., Шелефонток Д.И., Вороводин М.Ю. Оперативное определение компонентов скорости ветра с помощью лидара // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 2. С. 68–72.
4. Матвиенко Г.Г. Лидарные измерения скорости ветра с использованием стохастической структуры аэрозольных полей // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 6. С. 3–15.
5. Балин Ю.С., Бельский М.С., Разенков И.А., Сафонова Н.В. Пространственно-временная структура сигналов аэрозольного лидара // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 8. С. 77–83.
6. Белан Б.Д., Матвиенко Г.Г., Гришин А.И., Ковалевский В.К., Мелешкин В.Е. Сравнение лазерного и радиозондового методов зондирования скорости и направления ветра // Оптика атмосф. 1991. Т. 4, № 10. С. 1070–1076.
7. Астафуров В.Г., Игнатова Э.Ю., Матвиенко Г.Г. Эффективность лидарных измерений скорости ветра корреляционным лидаром // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 1, № 2. С. 497–503.
8. Гришин А.И., Матвиенко Г.Г. Лидарные исследования атмосферного аэрозоля в области ветровых сдвигов // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 7. С. 1056–1062.
9. *Сигналы* и помехи в лазерной локации / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.М. Креков, В.Л. Миронов, Ю.С. Балин, В.А. Банах, М.Л. Белов, Ю.Д. Копытин, В.П. Лукин; Под ред. В.Е. Зуева. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

V.I. Kozintsev, S.E. Ivanov, M.L. Belov, V.A. Gorodnichev. Correlation laser method with adaptive choice of measuring base for operational measurement of wind velocity.

Operational laser method of measurement of wind velocity in the atmosphere, using time correlation analysis, is considered. It is shown that measurement of aerosol inhomogeneities size and adaptive choice of measuring base in accordance with the obtained criterion allow the increase of the accuracy of operational measurement of wind velocity by correlation lidar.