

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.501.7 :551.508.822

Б.Д. Белан, Г.Г. Матвиенко, А.И. Гришин, В.К. Ковалевский, В.Е. Мелешкин

СРАВНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО И РАДИОЗОНДОВОГО МЕТОДОВ ЗОНДИРОВАНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Проведено сравнение результатов одновременного зондирования скорости и направления ветра в нижней атмосфере трёхтрассовым лидаром и аэрологической системой «Метеор-РКЗ». Лидар реализовывал временной корреляционно-спектральный метод измерения скорости ветра по переносу аэрозольных полей между тремя трассами зондирования.

Сравнение показало удовлетворительное совпадение методов в пределах 2,4 м/с по скорости ветра и 32° по направлению в величинах среднеквадратических отклонений. Предложены меры по улучшению характеристик лидара.

Прогресс в решении проблем прогноза погоды, климата, охраны окружающей среды во многом определяется успехами в разработке и создании принципиально новых средств контроля состояния атмосферы и подстилающей поверхности. К таким средствам относятся прежде всего лидары, осуществляющие диагностику среды с помощью лазерного излучения [1, 2]. Они выгодно отличаются от контактных приборов оперативностью, дистанционностью, высоким пространственным разрешением при сопоставимых точностных характеристиках. Вопрос сопоставимости и является предметом настоящей статьи. Он частично рассматривался нами ранее [3], однако достаточно полных сравнительных измерений не было проведено. Согласно [4] к основным методам сверки приборов относятся:

1. Непосредственное сличение с образцовыми средствами измерений. Этот метод — самый распространённый. В основе его лежит одновременное измерение одной и той же величины поверяемым и образцовым приборами. При использовании метода необходимо следить, чтобы оба прибора измеряли действительно одну и ту же величину, поэтому непосредственное сличение приборов, обычно проводится в специально выбранных условиях.

2. Сличение с использованием прибора сравнения (компаратора). В качестве компаратора при сличении используются устройства, которые должны обладать такой чувствительностью, чтобы с их помощью можно было обнаружить изменения измеряемой величины, не превышающие значение погрешности образцового прибора. Сличение приборов с помощью компарирующих устройств может обеспечить очень высокую точность поверки. Метод применяется в основном при сличении с эталонами и исходными образцовыми средствами.

3. Поверка приборов по образцовой мере. В этом случае она сводится к измерению величины, воспроизводимой образцовой мерой или сопоставляемой с ней.

С помощью перечисленных методов достигается основная цель поверки — определение, или оценка, основной погрешности приборов, которая находится как наибольшая разность между результатами измерения и соответствующими им размерами мер.

Само качество поверки определяется отношением числа неправильных поверок n к общему числу их N , т.е. n/N . Чем ближе значение n/N к нулю, тем более надежны результаты поверки. В [5] показано, что отношение n/N зависит главным образом от двух аргументов

$$\frac{n}{N} = f\left(\frac{\Delta}{\sigma}; \frac{\sigma}{\sigma_{\text{обр}}}\right),$$

где Δ/σ — отношение допустимой погрешности Δ к среднеквадратической погрешности поверяемых приборов σ (поле допуска симметрично и равно 2Δ); $\sigma/\sigma_{\text{обр}}$ — отношение среднеквадратических погрешностей поверяемых и образцовых средств измерения. При этом величина Δ/σ характеризует качество изготовления, а величина $\sigma/\sigma_{\text{обр}}$ — качество поверки.

Целью настоящей работы является оценка точности измерения скорости и направления ветра лазерным спектрально-корреляционным методом, физическая сущность, методическое обоснование и принципы реализации которого рассмотрены подробно в [6, 7].

Исходя из вышесказанного, при поверке точности лазерного спектрально-корреляционного способа измерения ветра наиболее приемлемым является первый метод, а именно метод непосред-

венного сличения с образцовым средством измерений. Однако в мировой практике в настоящее время отсутствуют общепризнанные образцовые средства измерений для оценки точности измерения скорости и направления ветра аэрологическими системами [8]. Поэтому поверочные испытания проводятся путем сравнительных измерений одной и той же величины различными системами. Этим достигается сопоставимость данных, полученных разными способами, а также повышаются однородность и единство аэрологической информации. Кроме того, сравнительные испытания позволяют получить информацию об особенностях измерений разными способами, необходимом наземном обеспечении и о способах обработки результатов, наметить пути дальнейшего совершенствования техники и методик.

В соответствии с [4] при проведении поверочных испытаний важно создать или контролировать условия поверки. Под условиями поверки следует понимать состояние физических величин, влияющих на метрологические параметрыверяемых средств измерения. Так как сравнительные испытания аэрологических систем осуществляются в атмосфере, которая отличается исключительной изменчивостью всех величин, то при выборе образцового средства поверки следует учитывать этот фактор.

Общепринятым [9] является то, что при измерении любых метеорологических величин необходимо усреднение (пространственное и временное) получаемых данных, так как единичное наблюдение в единичном пункте не является репрезентативным. Вопросы выбора надлежащего способа усреднения и практической реализации его в приборе являются одними из важнейших при разработке измерительных приборов, поэтому, при сравнении различных систем измерения в атмосфере необходимо учитывать пространственное и временное осреднения, реализуемые в них.

Следует учесть, что усреднение не является единственным критерием при практической оценке. Важным фактором является также экономичность метода. При прочих равных условиях предпочтительно использовать такой метод, который обеспечивает ту же точность при меньшем объеме исходных данных или при более простой обработке. При этом решение об оптимальном соотношении точности и экономичности приходится принимать интуитивно, и правильность его зависит от квалификации и опыта специалиста, в первую очередь, оттого, насколько он представляет себе области применения данных наблюдений и их специфические особенности.

Все изложенное учитывалось при выборе образцового средства поверки лазерного спектрально-корреляционного метода измерения ветра. Анализ, выполненный нами в [3], показал, что наиболее близкими к лазерному (по перечисленным характеристикам) являются шаропилотный базисный метод, метод тетранов и радиозондовый. В настоящей работе использовался радиозондовый, реализованный с помощью системы «Метеор-РКЗ». Хотя радиозондовый метод несколько и уступает в точности шаропилотному базисному, но при выборе было учтено, что система «Метеор-РКЗ» является основной на сети СССР, кроме того, она применяется в некоторых зарубежных странах и прошла успешные сравнительные измерения с системой «МикроКОРА» (Финляндия), которая, в свою очередь, весьма широко используется в мире [8, 10].

В ходе сравнительных измерений система «Метеор-РКЗ» работала в обычном режиме [11]. В соответствии с данными [12, 13] для нижнего 1...3 км слоя были приняты следующие значения среднеквадратических отклонений: скорость ветра $\sigma_V = 2 \dots 3$ м/с при $V \leq 10$ м/с, $\sigma_V = 1 \dots 2$ м/с при $V > 10$ м/с; направление ветра $\sigma_\alpha = 20^\circ$ при $V \leq 10$ м/с, $\sigma_\alpha = 5 \dots 10^\circ$ при $V > 10$ м/с.

Контролируемым средством являлся ветровой лидар [6], имеющий следующие характеристики:

Передатчик

длина волны, мкм	0,53
энергия лазерного импульса, Дж	0,12
длительность импульса, нс	15
частота следования импульсов, Гц	12,5

Приемник

диаметр телескопа, м	0,3
поле зрения телескопа, мрад	10
фокусное расстояние, мм	650

Система обработки (АЦП)

число каналов	3
число разрядов, бит	8
частота квантования, МГц	15
емкость буфера, байт	1024

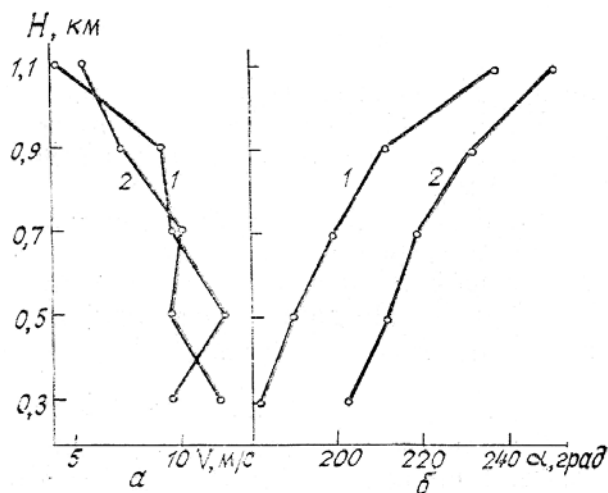
Компьютер — ДВК-3 с электронным диском емкостью 1 Мбайт.

Данный лидар реализовывал корреляционный принцип измерения скорости случайно-неоднородной среды, контролируемой тремя временными датчиками, пространственно размещенными в вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника [6]. Приемопередатчик лидара был уста-

новлен на сканирующую по образующей конуса около вертикальной оси платформу, излучение зондирующих импульсов и прием аэрозольных эхосигналов осуществлялись при трех положениях платформы. Наибольшее угловое расстояние между трассами составляло 18°. Ветровой перенос аэрозольных неоднородностей приводил к тому, что временные ряды эхосигналов минимум по двум трассам повторяли друг друга, но с определенной временной задержкой, которая зависит как от расстояния между точками съема информации, так и от скорости переноса аэрозольных неоднородностей. Так как расстояние между точками фиксировано и известно, то оценивая временные задержки на каждом высотном уровне с использованием корреляционного или спектрального анализа можно получить профиль скорости и направления ветра.

Обобщенные информационные показатели ветрового лидара следующие: количество высотных уровней, с которых поступает информация, — 128; пространственное разрешение — 10 м; число измерительных каналов — 3; число высотных профилей, накапливаемых по каждому каналу, — 1024; интервал накопления данных — 23...24 мин; время пересчета в физические величины — 5 мин; период сканирования — 1,4 с.

Сравнительные измерения проводились на полигоне «Южный» ИОА СО АН СССР в период с апреля по июнь 1989 г. Территориально лидар и место выпуска радиозонда РКЗ-2 располагались на площадке с радиусом 30 м. Синхронное зондирование обеими системами осуществлялось как в дневное, так и ночное время суток. Опорными сроками являлись 1, 18, 20 и 24 часа местного времени. Сроки 18 и 20 считались дневными. Так как время накопления информации лидаром превышало 20 мин, то он начинал зондирование за 5 мин до выпуска радиозонда.



Высотные профили скорости (а) и направления (б) ветра, измеренные лидаром — 1 и радиозондом — 2 31 мая 1989 г. в 20 ч

Всего было проведено 42 сравнительных измерения. Из них 16 дневных и 26 ночных. Измерения проходили при следующих метеоусловиях: ясной атмосфере, дымке и осадках. Скорость ветра в атмосфере в период эксперимента изменялась от 1 до 30 м/с. Пример одной из реализаций приведен на рисунке, где показано вертикальное распределение скорости и направления ветра. Видны расхождения между обоими методами.

В связи с различием в пространственном разрешении между лидаром и радиозондом (в стандартном исполнении [11]) данные измерений усреднялись по вертикальным слоям протяженностью 200 м, начиная с высоты 200 м. Слои центрировались на высотах 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 и 1,1 км. Высота 0,1 км не учитывалась для исключения влияния орографии местности и воздействия здания полигона.

Методика испытаний по оценке точности измерения параметров ветра лидаром включала расчет систематических, среднеквадратических и средневзвешенных отклонений скорости и направления ветра, определяемых лидаром и системой «Метеор-РКЗ», по которым, с учетом известных погрешностей последней системы можно судить о точностных характеристиках лидаров. Перечисленные отклонения параметра x рассчитывались по следующим выражениям:

$$m_{xj} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \Delta x_{ij}, \quad \sigma_{xj} = \left[\frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (\Delta x_{ij} - m_{xj})^2 \right]^{1/2},$$

где Δx_{ij} — частные разности испытываемого и контрольного средств на j -уровне; i — номер измерения на j -высоте; n_j — число измерений на j -уровне.

Средневзвешенные отклонения определялись по всему объему опытных данных

$$m_{0,x} = \frac{\sum_{j=1}^N n_j m_{x,j}}{\sum_{j=1}^N n_j}, \quad \sigma_{0,x} = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^N n_j} \sum_{j=1}^N n_j \sigma_{x,j}^2 \right)^{1/2},$$

где N – количество высотных уровней.

Кроме того, величины m_0 и σ_0 сгруппированы по величине скорости ветра в следующих градациях: 1...10, 10...15, 15...20, 20...25 и 25...30 м/с.

Помимо точностных характеристик: определялась и максимальная высота зондирования лидаром. За нее принималась такая величина, при которой среднеквадратическое отклонение скорости ветра было равно 1,0 м/с. По данным всех измерений, среднее значение максимальной высоты \bar{H}_{\max} зондирования ветровым лидаром составило

$$\bar{H}_{\max} = (0,85 \pm 0,23) \text{ км.}$$

Остальные характеристики собраны в табл. 1 и 2. Причем в табл. 1 приведены значения n_j , показывающие объем информации, использованный для оценки отклонений между измерителями.

Таблица 1

Статистические характеристики разностей показаний радиозонда и лидара

Высота, км	m_V , м/с	m_α , град	σ_V , м/с	σ_α , град	n_j
0,3	0,15	–21,5	2,54	33,4	42
0,5	–0,40	–22,8	2,22	30,1	42
0,7	–1,35	–12,4	2,00	39,3	42
0,9	–1,50	–19,8	2,95	33,7	30
1,1	–0,71	–22,8	2,63	24,7	26

Из представленных в табл. 1 и 2 данных видно, что оба метода удовлетворительно согласуются между собой по измерению скорости и направления ветра. Наблюдаются систематические отклонения скорости и направления ветра. Для направления ветра отклонения m_α имеют отрицательный знак и абсолютные значения в диапазоне 20 ... 23°. Для скорости систематические отклонения также отрицательны (если исключить высоту 0,3 км, где значения m_V положительны и очень малы – 0,15 м/с) и возрастают по величине с ростом высоты. При этом на высоте 1,1 км m_V не возрастает, а, наоборот, уменьшается по сравнению с высотой 0,9 км, что может быть обусловлено недостаточным количеством совместных измерений V на этой высоте ($n_j = 26$) в отличие от других высот, где $n_j = 42$.

Наличие систематических отклонений имеет причины, связанные с несогласованностью геодезической привязки системы «Метеор-РКЗ» и ветрового лидара (для направления ветра) и неточностью юстировки трасс лидара, или установки угла между трассами, которая приводит к погрешностям линейного расстояния между трассами на различных высотах (для скорости ветра). В пользу последней причины указывает увеличение m_V по мере роста высоты.

Среднеквадратические отклонения скорости ветра составили 2,0...2,9 м/с, направления ветра 24...39° практически не зависят от высоты. С учетом погрешностей системы «Метеор-РКЗ» [12, 13] и независимости измерителей можно утверждать, что среднеквадратическая погрешность ветрового лидара сравнима с погрешностью аэрологической системы и изменяется для модуля скорости в диапазоне 0,5 ... 1,5 м/с и 15...25° для направления. Отсутствие зависимости погрешностей от высоты говорит о незначительном искажающем влиянии участка трассы зондирования до исследуемой дальности и шумов до дальностей, где уровень отношения сигнал-шум не менее 2-х (алгоритм обработки сигналов лидара предусматривал оценку отношения сигнал-шум, под которым понималось отношение дисперсии флуктуаций эхо-сигнала к дисперсии шума, и ограничение высоты зондирования отношением сигнал-шум, равным 2).

Не обнаруживаются также и тенденции увеличения различий с увеличением скорости ветра (табл. 2), что указывает на работоспособность лидарного метода в широком диапазоне скоростей.

Следует отметить, что на величины различий между методами могла сказаться временная изменчивость поля ветра, которая вносит вклад в показания лидара из-за существенно большего временного интервала измерения (~ 20 мин) в отличие от радиозонда (~30 ... 40 с). Пространственные разрешения методов за счет введения в лидарные данные осреднения по высоте удалось сделать одинаковыми.

Средневзвешенные отклонения скорости ветра для её различных значений

Скорость, м/с	m_0 , м/с	σ_0 , м/с
1...10	—0,54	2,40
10...15	—0,76	2,50
15...20	—0,81	2,34
20...25	—0,12	2,38

В заключение приведем некоторые данные об особенностях зондирования ветровым лидаром.

Из анализа условий работоспособности лидара следует, что днем потолок зондирования уменьшается в среднем на 25 ... 30% из-за увеличения фоновых шумов, причем фоновая засветка возрастает при появлении облачности, особенно кучевой. Осадки во многих случаях ухудшают условия работы ветрового лидара, что связано со слабой увлекаемостью капель, вымыванием аэрозоля и наличием у частиц большой вертикальной составляющей скорости [14]. Вместе с тем в слабых осадках (интенсивность менее 2 мм/ч) процесс зондирования даже облегчается по сравнению с чистой атмосферой, что обусловлено возрастанием сигнала на фоне шумов.

Проведенное сравнение позволило наметить пути совершенствования ветрового лидара. Применение более мощной ЭВМ позволит сократить время измерения одного профиля в 4—5 раз. Увеличение скорости сканирования до 10 об/с, улучшение характеристик интерференционных фильтров, повышение частоты следования импульсов и их энергии приведут к уменьшению погрешности измерений и росту высоты зондирования. Установка совершенных элементов и узлов для более точной геодезической привязки лидара и определения углов между трассами зондирования обеспечит устранение систематической составляющей погрешности.

1. Зуев В. Е. Лазер-метеоролог. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 178 с.
2. Зуев В. Е. // Достижения в области гидрометеорологии и контроля природной среды. Л.: Гидрометеоздат, 1987. С. 98.
3. Колев И., Ненков К., Матвиенко Г., Белан Б. // Българо-съветски семинар «Лазерни методи и средства за измерване и контрол на параметрите на околната среда». Сб. докл. София: ИЭ БАН, 1985. С. 144.
4. Фатеев Н. П. Проверка метеорологических приборов. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 312 с.
5. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений. М.: Стандарт, 1973. 191 с.
6. Матвиенко Г. Г., Задде Г. О., Фердинандов Э. С. и др. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука, 1985. 224 с.
7. Белан Б. Д., Гришин А. И., Матвиенко Г. Г., Самохвалов И. В. Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1989. 152 с.
8. Кархунен П., Трифионов Г. П., Юрманов В. А. // Метеорология и гидрология. 1987. № 11. С. 111.
9. Каган Р. Л. Осреднение метеорологических полей. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 214 с.
10. Зайцева Н. А., Ахметьянов Р. Х., Кархунен П. // Метеорология и гидрология. 1989. № 1. С. 105.
11. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеоздат, 1973. Вып. 4. Ч. III а. 256 с.
12. Дербенев Б. С., Истомин Б. П. // Метеорология и гидрология. 1964. № 6. С. 46.
13. Зайцева Н. А. // ТРОПЭКС-74. Л.: Гидрометеоздат, 1976. Т. 1. С. 712.
14. Гроздовский Г. Л. // Учен. зап. ЦАГИ. 1974. т. 5. № 2. С. 80.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
6 июня 1991 г.

B. D. Belan, G. G. Matvienko, A. I. Grishin, V. K. Kovalevskii,
V. E. Meleshkin. **Intercomparison between the Lidar and Radiosonde Techniques for Measuring the Wind Speed Vector.**

A comparative analysis of data on wind speed vector measured simultaneously in the low atmosphere with the three-path lidar and aerological system «METEOR-RKZ» is presented. The lidar wind measurements are based on the use of correlation and spectral analysis of lidar returns fluctuations caused by the aerosol inhomogeneities drift between three lidar sounding paths. The comparison has shown quite satisfactory agreement between the lidar and radiosonde data, the rms deviations of the wind speed values being about 2,4 m/s and wind directions 32 degrees. Certain measures to improve the lidar facility characteristics are suggested.