

Р.Д. Кузнецов

Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 19.11.2005 г.

Приведено описание конструкции и принципа работы нового акустического локатора (сонара) ЛАТАН-3. Прибор предназначен для измерений вертикальных профилей вектора скорости ветра и интенсивности температурных флуктуаций с высоким разрешением по времени. Это позволяет использовать локатор для исследований атмосферной турбулентности и когерентных структур в диапазоне высот до нескольких сотен метров. Приведенные результаты полевых испытаний сонара показывают хорошее согласие сонарных измерений характеристик поля ветра с локальными измерениями на метеорологической мачте.

Введение

Современные коммерческие акустические локаторы (сонары) применяются для измерения профилей скорости ветра в атмосферном пограничном слое. Методика таких измерений хорошо отработана [1, 2] и позволяет определять средние (за 10–60 мин) профили скорости и направления ветра с точностью, соответствующей метеорологическим стандартам. Однако техника акустического зондирования позволяет получать гораздо больше информации о структуре пограничного слоя атмосферы [3].

Сонар ЛАТАН-3 разрабатывался для исследования когерентных структур и турбулентности в атмосферном пограничном слое, а также для традиционных измерений вертикальных профилей скорости и направления ветра. При создании прибора ставилась задача обеспечить его простоту и надежность, а также возможность контроля сигналов на любой стадии их обработки.

В сонаре основная часть операций по формированию зондирующего импульса и обработке принятого эхосигнала выполняется с помощью программ на персональном компьютере. Похожий подход успешно реализован в некоторых других сонарах, например в сонаре «Волна-3» [4]. Однако конструкция последнего, несмотря на оригинальные алгоритмы обработки, скорее следует тенденциям развития сонаров общего назначения.

Ниже описаны архитектура и алгоритмы сонара ЛАТАН-3 с примером получаемых данных, а также приведены результаты полевых испытаний прибора на Звенигородской научной станции (ЗНС) ИФА.

1. Конструкция прибора

Аппаратная часть сонара ЛАТАН-3 (рис. 1) состоит из управляющего компьютера, усилителя мощности зондирующего импульса (Amp1), антенного коммутатора (КМ), трех акустических антенн в звукозащитных экранах (A1, A2 и A3) и микрофонного усилителя (Amp2).

Зондирующий импульс через линейный выход звуковой карты (Line out) после усиления подается на антенну. По окончании излучения коммутатор подключает к антенне микрофонный усилитель, с которого сигнал попадает на линейный вход звуковой карты для оцифровки. Микрофонный усилитель обладает полосой пропускания (500–10000 Гц), что позволяет, с одной стороны, избавиться от заметной части шумов до оцифровки, а с другой — не фиксировать аппаратно рабочую частоту прибора. По окончании приема эхосигнала коммутатор подключает к усилителю мощности следующую антенну. После опроса всех трех антенн цикл измерений повторяется.

ЛАТАН-3 работает с антеннами, выполненными в виде параболического отражателя с рупорным

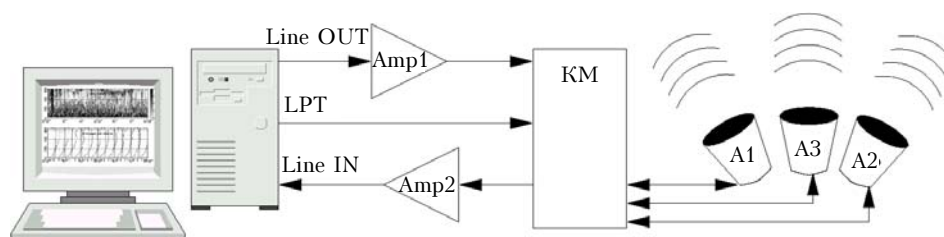


Рис. 1. Упрощенная блок-схема сонара ЛАТАН-3

громкоговорителем в фокусе. К настоящему времени успешно опробована эксплуатация с антеннами от содаров ЛАТАН-1 и Echo1-D с апертурой 1,2 м, а также минисодара ЛАТАН-2 с апертурой 0,6 м.

Временная диаграмма опроса антенны формируется с помощью встроенного таймера звуковой карты. Коммутатор управляется компьютером через параллельный порт (LPT). Очередность и периодичность опроса антенн, а также параметры зондирования устанавливаются программно.

В содаре ЛАТАН-3 используется персональный компьютер с операционной системой GNU/Linux. Для функционирования содара достаточно быстрого действия среднего персонального компьютера предыдущего поколения.

Опрос антенн, первичная обработка эхосигнала, осреднение данных, а также графическое отображение результатов измерений осуществляются отдельными программами. Параметры работы содара задаются при помощи текстовых конфигурационных файлов. Кроме специально созданного программного обеспечения, в работе содара широко используются стандартные средства системы GNU и другие свободно распространяемые программы.

Пример графиков, построенных с помощью одной из графических программ, созданных для содара, приведен на рис. 2. На рис. 2, а изображена «отражаемость» (интенсивность эхосигнала с поправкой на сферическую расходимость зондирующего импульса), а на рис. 2, б — серия профилей скорости и направления ветра. Похожие диаграммы можно просматривать в реальном времени как непосредственно на экране управляющего компьютера, так и удаленно.

2. Первичная обработка сигнала

В содаре ЛАТАН-3 реализован алгоритм, который осуществляет анализ эхосигнала от каждого зондирующего импульса в отдельности, что позволяет получать данные с максимальным разрешением по времени. Для каждого высотного интервала определяются три величины: интенсивность сигнала с шумом, интенсивность шума (дБ), а также лучевая компонента ветра по частоте принятого сигнала f :

$$V_R = \frac{c}{2f_0} (f_0 - f),$$

где c — скорость звука; f_0 — частота зондирующего импульса. На основании этих данных затем определяются компоненты скорости ветра и их дисперсии.

На каждом высотном интервале рассчитывается Фурье-спектр мощности эхосигнала, дополненной нулями до числа отсчетов в степени два так, чтобы общее число отсчетов увеличилось в несколько раз. Обработка спектров выполняется последовательно от нижних уровней к верхним. Доплеровская частота оценивается в два этапа. Первичная оценка для нижнего высотного интервала получается как центр масс спектра в интервале ± 10 м/с вокруг частоты. (Здесь мы будем измерять частоты в единицах лучевой скорости.)

Для последующих высотных интервалов центр масс рассчитывается в интервале ± 3 м/с вокруг последней *надежной* оценки. Окончательно лучевая скорость вычисляется как центр масс спектра в «сигнальной» полосе $\pm 1,5$ м/с вокруг первичной оценки,

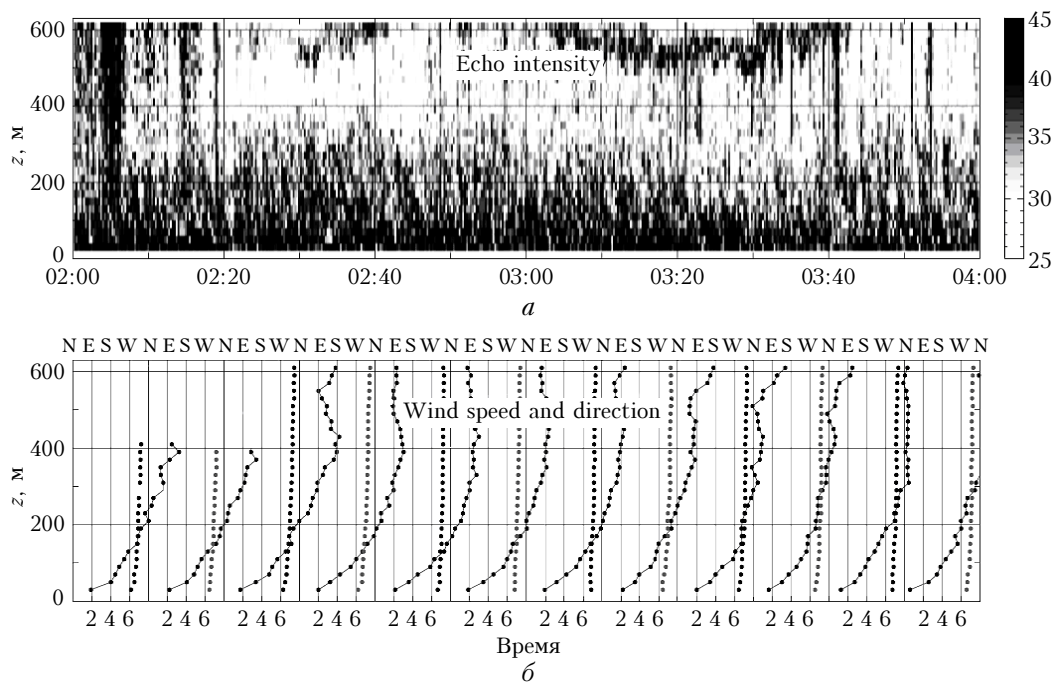


Рис. 2. Эхограмма (уровень сигнала, дБ) (а) и серия 10-минутных профилей скорости (б) (линия с точками, шкала снизу, м/с) и направления (точки, шкала румбов сверху) ветра. 2 июля 2005 г., ЗНС, время местное

а интенсивность сигнала — как средняя мощность в такой же полосе вокруг окончательной оценки. Интенсивность шума оценивается как средняя мощность в двух полосах шириной 6 м/с, прилегающих к сигнальной полосе.

Оценка доплеровской частоты считается надежной, если интенсивность в сигнальной полосе превышает интенсивность шума не менее чем на 4,5 дБ. Такой алгоритм обеспечивает большую помехоустойчивость по сравнению с простым вычислением центра масс спектра.

Для иллюстрации работы алгоритма мы выбрали эхосигнал, полученный на наклонной антенне (зенитный угол 30°), с сигналом частотой 1700 Гц и длительностью импульса $\tau = 100$ мс. При этом разрешение по дальности $\Delta h = c\tau/2 = 17$ м, а доплеровская чувствительность $\Delta f/V_R = 10$ Гц/(м/с). Спектры, соответствующие различным высотным интервалам, показаны на рис. 3. Полоса предварительного поиска обозначена жирной линией, а сигнальная полоса зачернена.

Средние профили ветра и эффективности рассеяния рассчитываются на основе данных серии отдельных зондирований. Для осреднения используются данные с соотношением сигнал-шум, превышающим определенное значение, которое выбирается в зависимости от конкретной задачи.

3. Результаты полевых испытаний

Полевые испытания содара ЛАТАН-3 проводились в июле 2005 г. на Звенигородской научной станции ИФА в 50 км к западу от Москвы. При испытаниях использовались антенны содара ЛАТАН-1. Содар был установлен в 50 м от 56-метровой метеорологической мачты, на крыше двухэтажного лабораторного корпуса. На мачте был установлен акустический анемометр USA-1 (МЕТЕК, Германия), который, вслед за производителем, будем называть «соник» (от англ. *sonic anemometer*).

Данные обоих приборов регистрировались круглослучно. Зондирование проводилось 100-мс импульсами частоты 1700 Гц в высотном диапазоне 20–610 м с разрешением по высоте 20 м. Период цикла зондирования составлял 15 с, зенитные углы наклонных антенн составляли 30° и 25° .

Для оценки точности измеряемых содаром значений данные второго высотного интервала (40–60 м плюс высота лабораторного корпуса 10 м) сравнивались с данными контактных измерений на высоте 56 м. Поскольку техника измерений ветра акустическим анемометром в настоящее время хорошо отработана, данные «соника» приняты за эталонные.

Для сравнения использовались содарные данные, прошедшие отбраковку: из осреднения выброшены данные с соотношением сигнал-шум меньше 4 дБ, а к обработке приняты только надежные средние, в которых более 80% удачных измерений для ветра и более 90% для дисперсий. Направление ветра (как для содара, так и для «соника») рассчитывалось по средним значениям лучевых компонент. При оценке согласия измеренных направлений ветра не учитывались точки со средней скоростью менее 2 м/с (по содару). В целом было отбраковано около 10% усредненных данных. Такой высокий процент обусловлен близостью шоссе к месту проведения испытаний. Корреляционные графики для измеренных параметров приведены на рис. 4. На графиках указаны значения коэффициентов линейной регрессии и взаимной корреляции.

Содарные данные о лучевых компонентах ветра хорошо согласуются с данными «соника». Для модуля горизонтальной скорости ветра V согласие хотя и находится в пределах метеорологической точности, но несколько хуже, поскольку погрешность V при использовавшихся зенитных углах в 2–3 раза (в зависимости от направления) превышает ошибку определения лучевой скорости. Направление ветра, определяемое содаром, хорошо согласуется с данными «соника».

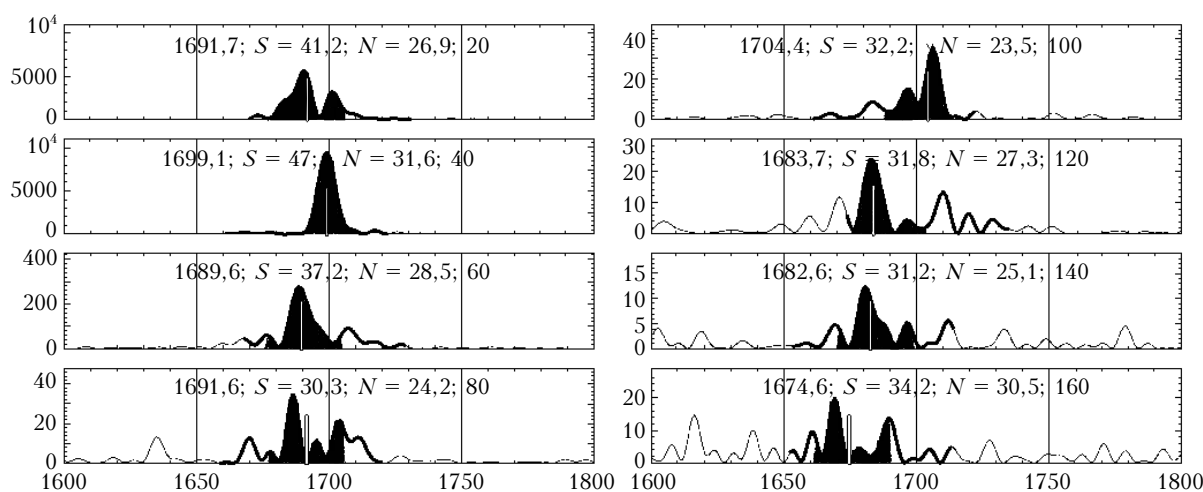


Рис. 3. Спектры эхосигнала от единичного зондирующего импульса, принятого наклонной антенной с последовательных высотных интервалов. Указаны частота сигнала (Гц), интенсивности сигнала + шум S и отдельно шума N (дБ), а также нижняя граница высотного интервала, м

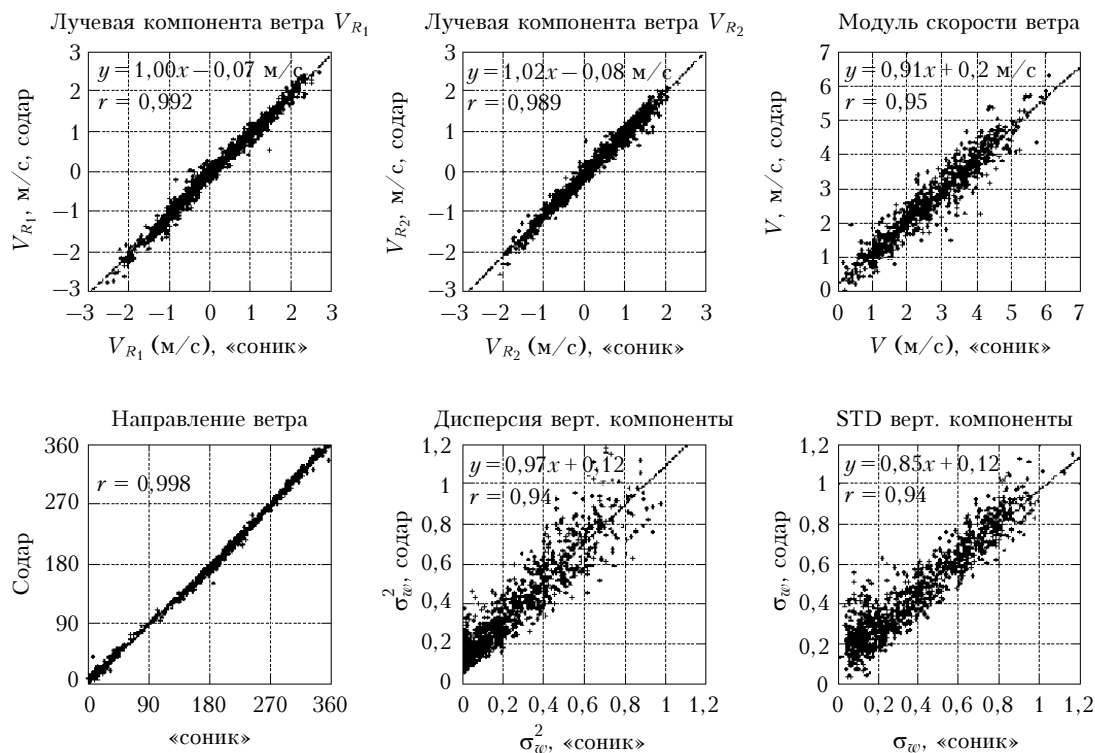


Рис. 4. Сопоставление осредненных по 30 мин данных дистанционных ($z = 60$ м) и контактных ($z = 56$ м) измерений

Содар систематически завышает значение дисперсии вертикальной компоненты скорости ветра σ_w^2 . Близкие к единице коэффициенты линейной регрессии и корреляции для σ_w^2 указывают на то, что ошибка w носит случайный характер. По-видимому, причиной такой ошибки является принципиальная невозможность более точного определения значения частоты некогерентного эхосигнала по короткой реализации (около 200 периодов). Стандартное отклонение вертикальной компоненты вычислялось как

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_w^2 - \delta},$$

где $\delta = 0,07 \text{ м}^2/\text{с}^2$ — наименьшее из измеренных содаром значений σ_w^2 . Из рис. 4 видно, что вычисленные таким образом значения хорошо ложатся на прямую. Это подтверждает правомочность такого способа коррекции ошибки измерений.

Заключение

Описанный алгоритм обработки первичного эхосигнала, несмотря на свою простоту, оказался довольно эффективным даже в условиях города. Он не обеспечивает отбраковку из выдаваемых данных узкополосных шумов и отражений от местных предметов. Для исследовательского прибора это, скорее, является достоинством, поскольку использование простых алгоритмов позволяет сделать работу прибора понятной и облегчает идентификацию артефактов в результатах измерений при их последующей обработке.

Подход, использованный в содаре ЛАТАН-3 (минимум специализированной электроники, простота алгоритмов), показал свою перспективность. Точность измеряемых содаром значений достаточна для решения многих задач. Аналогичные испытания других содаров [5, 6] показывают сопоставимые, а в ряде случаев и большие, чем у ЛАТАН-3, ошибки измерений. Индивидуальные измерения лучевых скоростей имеют точность около 0,3 м/с. Это заметно меньше характерных скоростей в конвективных образованиях (1–2 м/с), что указывает на возможность использования содара ЛАТАН-3 для исследований когерентных структур в атмосферном пограничном слое.

Содар обладает большой гибкостью в использовании. Практически все параметры работы содара доступны для настройки в произвольных пределах. Содар может работать с различными типами антенн.

В настоящее время два экземпляра содара ЛАТАН-3 используются для долгосрочных измерений по программе изучения атмосферной турбулентности и поля скорости ветра над Москвой. Один из них установлен в центре Москвы на крыше ИФА, другой — ближе к окраине города на крыше здания, где находится физический факультет МГУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 06-05-08086 и 06-05-65270).

1. Kallistratova M.A. Acoustic and radio-acoustic remote sensing study in the former USSR // Int. J. Remote Sens. 1994. V. 15. N 2. P. 251–266.
2. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: ИОМ СО РАН, 2001. 278 с.
3. Coulter R.L., Kallistratova M.A. Two decades of progress in sodar techniques: a review of 11 ISARS pro-

- ceedings // Meteorol. and Atmos. Phys. 2004. V. 85. P. 3–19.
4. Гладких В.А., Макиенко А.Э., Федоров В.А. Акустический доплеровский локатор Волна-3 // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 437–444.
5. Gaynor J. E. Accuracy of sodar wind variance measurements // Int. J. Remote Sens. 1994. V. 15. N 2. P. 313–324.
6. Atmospheric Research Company web site. <http://www.sodar.com>

R.D. Kuznetsov. Acoustic sounder LATAN-3 for studies of the atmospheric boundary layer.

We describe the new acoustic sounder (sodar) developed in the Obukhov Institute of Atmospheric Physics. The sodar is designed for measurements of wind and temperature structure parameter profiles with high temporal resolution. The sodar can be used in studies of turbulence and coherent structures in range from several tens to few hundred meters above the ground level. The results of comparison of measured values indicate a good agreement with those obtained from *in situ* sensors.