

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.501.7

В.А. Гладких, В.И. Карпов, Н.П. Красненко, Б.Н. Молчанов, М.Г. Фурсов

АКУСТИЧЕСКИЙ ЛОКАТОР «ЗВУК-1»: НОВЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ

На основе опыта эксплуатации акустических метеорологических локаторов сформулированы обобщенные потребительские требования к конструкции локатора. Приведено краткое описание разработанного в ИОА СО РАН коммерческого варианта локатора, его программного обеспечения, продемонстрированы возможности обработки полученной информации. Локатор «Звук-1» позволяет контролировать температурную стратификацию пограничного слоя атмосферы до высоты 500 м, измерять структурную постоянную поля температуры, толщину слоя перемешивания, оценивает достоверность полученных результатов по соотношению «сигнал/шум».

Практически все метеорологические акустические локаторы, изготовленные в стране до настоящего времени, использовались для исследования атмосферных процессов лишь их непосредственными разработчиками либо при их участии. Внедрение локаторов в метеорологическую сеть сдерживалось, в ряду многих причин, тем обстоятельством, что использование данных, получаемых акустическими локаторами, требует определенного опыта в их приложении, а приобретение такого опыта практиками-метеорологами сдерживалось как отсутствием достаточного количества локаторов, так и неприемлемой для практического применения сложностью и надежностью имеющихся. Опыт эксплуатации акустических метеолокаторов в лаборатории атмосферной акустики ИОА СО РАН позволил выявить все недостатки таких устройств с точки зрения их практического применения и разработать концепцию проектирования коммерческого варианта акустического метеолокатора. Основные положения этой концепции можно сформулировать так:

1. Локатор должен быть малогабаритным без ущерба его техническим характеристикам.
2. Помехозащищенность локатора должна позволить потребителю не задумываться о выборе места установки локатора. Требования к выбору места должны быть минимальны.
3. Данные, получаемые при помощи локатора, должны быть понятны и легко применимы в практической метеорологии. В то же время должна сохраняться вся полнота информации, которую содержит рассеянный атмосферой акустический сигнал.
4. Локатор должен давать бесспорно достоверную информацию в любых условиях либо иметь надежный индикатор достоверности получаемых данных.
5. Степень автоматизации локатора должна обеспечить его работу без участия оператора. Обслуживание его работы не должно выходить за рамки минимального набора операций: включение, выключение, сбор готовых результатов измерений.

Именно эти требования были предъявлены к разработке нового акустического локатора «Звук-1» для контроля температурной стратификации пограничного слоя атмосферы. Три наиболее крупных направления этой работы коснулись разработки новой акустической антенны, электронной аппаратуры локатора и разработки программного обеспечения для ЭВМ, обслуживающей локатор.

Антенна акустического локатора — одна из наиболее важных его частей. Ее конструкция, размеры, примененные в ней материалы полностью определяют ее эффективность, а в конечном итоге и энергетический потенциал локатора в целом.

К разрабатываемой антенне были предъявлены следующие требования: ширина главного лепестка диаграммы направленности по половинной мощности в пределах $15 \dots 20^\circ$, уровень боковых лепестков в направлении, перпендикулярном акустической оси, не более — 40 дБ, под углом 70° от акустической оси — не более — 35 дБ. За основу конструкции был выбран зеркальный тип антенны с параболическим отражателем, снабженной защитной блендой в виде усеченного конуса. Диаграмма направленности такой антенны (в дальней зоне) определяется модифицированным дифракционным интегралом Кирхгофа [1, 2]:

$$P(\Theta) = \pi (1 + \cos \Theta) \int_0^{R_{s\max}} A(R_s) e^{j\varphi(R_s)} J_0(kR_s \sin \Theta) R_s dR_s.$$

Здесь Θ — угол от акустической оси; $A(R_s)e^{j\varphi(R_s)}$ — амплитудно-фазовое распределение акустического давления по верхней апертуре защитной бленды; R_s — текущий радиус верхней апертуры; k — волно-

вое число; $J_0(\dots)$ — функция Бесселя нулевого порядка. Распределение давления по верхней апертуре определяется выражением

$$A(R_s) e^{j\varphi(R_s)} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{\max}} A(R) e^{j\varphi(R)} e^{jk(D-t)} \gamma(D) R dR d\Phi,$$

где R — текущий радиус апертуры параболоида; H — высота защитной бленды; Φ — угол в плоскости апертуры параболоида; $D = \sqrt{R^2(\sin \Phi)^2 + (R_s - R \cos \Phi)^2 + H^2}$, $\gamma(D) = (1 - H / D) / 2D$.

Величина $A(R)e^{j\varphi(R)}$ описывает амплитудно-фазовое распределение акустического давления в апертуре параболоида. Можно показать, что если в качестве облучателя параболоида использован экспоненциальный рупор с диаметром раскрыва, превышающим критический для данной волны (реактивной составляющей излученной волны можно пренебречь), то распределение акустического давления в апертуре параболоида можно описать выражением

$$A(R) e^{j\varphi(R)} = \frac{3F^2(4F^2 - R^2)}{(4F^2 + R^2)^2 - 0,25(4F^2 - R^2)^2},$$

где F — фокусное расстояние параболоида. При расчете геометрических размеров параболического зеркала использовались следующие методики: графический способ определения коэффициента концентрации, исходя из необходимой ширины главного лепестка диаграммы направленности [3] и формулы, связывающие коэффициент усиления параболоида с его геометрическими размерами [4]. Рупорный облучатель параболоида рассчитан по методике, приведенной в [5]. С помощью полученных геометрических размеров, используемых в качестве исходных, и приведенного выше модифицированного интеграла Кирхгофа были получены геометрические размеры защитной бленды. Было оценено влияние отклонения размеров от оптимальных на форму диаграммы направленности. Оказалось, что ошибка в выборе геометрических размеров в несколько сантиметров ведет к увеличению уровня перпендикулярного бокового лепестка диаграммы в 10 и более раз, а изменение раскрыва бленды на 3 ... 5° приводит к смещению боковых лепестков по углу и расширению главного лепестка. На рис. 1 приведены диаграммы направленности разработанной антенны, измеренные на разных этапах ее изготовления. У полностью готовой антенны уровень перпендикулярного бокового лепестка диаграммы составил — 52 дБ, а под углом 70° от горизонтали — 47 дБ, т.е. значительно лучше, чем заданные исходные параметры для расчета. Изготовленная антенна достаточно малогабаритна: она имеет высоту немногим более 1,5 м и вес около 70 кг. Параболоид антенны снабжен термостатом, что позволяет локатору работать в зимних условиях. Очистка параболоида от осадков при этом не требуется.

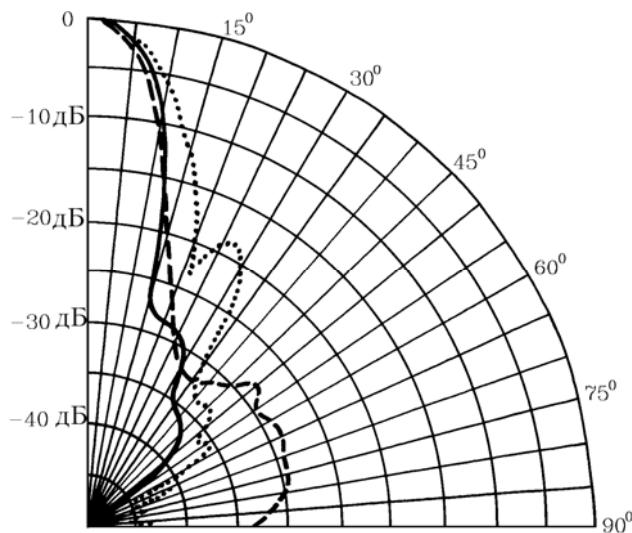


Рис. 1. Диаграммы направленности антенны локатора «Звук-1» на различных этапах ее изготовления: пунктирная линия — диаграмма направленности параболоида; точки — диаграмма направленности антенны с защитной блендой без звукопоглощающего слоя; сплошная линия — диаграмма направленности полностью готовой антенны

Электронная аппаратура локатора выполнена в виде настольного прибора. Структурная схема приемопередающего тракта традиционна, особенность данного локатора состоит в тщательной схемотехнической проработке всех узлов, направленной на повышение удобства обслуживания, надежности локатора в целом, экономичности и улучшение его технических характеристик. Приемопередающий тракт

локатора может быть использован как в комплекте с ЭВМ IBM PC/AT, так и без нее. В последнем случае регистрация отраженного сигнала производится на специально разработанный для акустических метеолокаторов малогабаритный электронскровой эхограф с записью эхограмм на термобумагу ТБ-1.

Передатчик локатора излучает в атмосферу импульс с трапецидальной огибающей с синусоидальным заполнением. Такая форма импульса обеспечивает по сравнению с прямоугольной более узкий спектр излучения и значительно повышает долговечность электроакустического преобразователя антенны. В случае необходимости приемопередатчик может быть переведен в адаптивный режим работы, при этом коэффициент передачи приемного тракта адаптируется к уровню окружающего шума и средний уровень сигнала на выходе приемника поддерживается постоянным. Чаще всего этот режим применим в случае работы локатора в комплексе с электронскровым эхографом.

Специально для локатора «Звук-1» разработан пакет прикладных программ, обеспечивающий работу локатора совместно с ЭВМ IBM PC/AT. В пакет входят программы, предназначенные для решения следующих задач:

1. Программа FAX_WRIT.EXE позволяет выводить на экран дисплея ЭВМ факсимильную запись отраженного атмосферой сигнала и профиль амплитуды принятого сигнала. Информация, выводимая на экран, записывается на магнитный диск в виде файла, причем в файл одновременно записывается непосредственно изображение факсимильной записи в виде графической информации, амплитуда принятого сигнала от каждой посылки в виде целых чисел и время каждой посылки с точностью до секунды. Программа удобна в пользовании, благодаря оконной структуре представляемой графической информации.

2. Программа PRF_WRIT.EXE полностью включает в себя возможности предыдущей программы. Отличие состоит в том, что она создает, кроме такого же файла, еще один файл, в котором хранятся высотные профили амплитуды принятого сигнала с четверо большим разрешением по высоте, чем в файле с графической информацией. Размеры записываемых файлов зависят от количества сохраненных профилей сигналов и составляют 132 байт/профиль для графическо-числовых файлов и 264 байт/профиль для файлов высокого разрешения.

3. Программа FAX_READ.EXE позволяет вывести на экран дисплея факсимильные записи сигналов и профили принятого сигнала из ранее записанных файлов. Предусмотрена возможность просмотра всего файла целиком, выбора любого нужного фрагмента записи, его растяжка для подробного просмотра, вывод факсимильной записи (целиком или ее фрагмента) на принтер в графическом режиме.

4. Программа FAXTOOLS.EXE позволяет выводить на экран дисплея факсимильные записи со скоростью, в пять раз превышающей скорость вывода программой FAX_READ.EXE, производит очистку факсимильной записи от шумовой засветки, вычисляет и высвечивает на факсимильной записи временной ход толщины слоя перемешивания примесей с записью его в специальный файл.

5. Программа СТ2.EXE производит вычисление профилей структурной постоянной поля температуры C_T^2 по данным локатора, записанным ранее в файлы программы FAX_WRIT.EXE и PRF_WRIT.EXE. Программой автоматически производится контроль достоверности результата по соотношению «сигнал/шум» и отбраковка недостоверных значений C_T^2 . Вычисленные значения записываются в отдельный файл, имя которого совпадает с именем исходного файла и ему присваивается расширение *ct2*.

6. Программа СТ2READ.EXE выводит на экран высотные профили C_T^2 из файлов с расширением *ct2* в виде графиков.

Помимо перечисленных, для локатора разработаны другие программы, позволяющие производить накопление результатов, вычислять их статистические характеристики, выводить на экран взаимокорреляционные функции профилей сигнала, трехмерное изображение сигнала в координатах «амплитуда – высота – текущее время» и др. Все разработанные программы имеют высокие сервисные возможности и широко используют возможности цветной графики ЭВМ. Программное обеспечение локатора постоянно совершенствуется, возможности его расширяются.

На рис. 2 продемонстрирована способность программы FAXTOOLS.EXE производить очистку принятого сигнала от окружающего шума. На рис. 2, а изображена факсимильная запись сигнала, на которой в верхней части, начиная с высоты 250 м и выше, наблюдается шумовая засветка из-за действия корректора расходимости звукового луча. В нижней части записи на высоте 35–40 м наблюдается резкая черная полоса, обусловленная переходными процессами в аппаратуре локатора. Такие факсимильные записи довольно редки и получаются при зондировании пограничного слоя атмосферы в условиях стратификации, близких к безразличной, когда средний уровень отраженного сигнала мал по сравнению с окружающим шумом. Интерпретация таких записей требует определенного навыка и в некоторых случаях может дать ошибочный результат.

Программа FAXTOOLS.EXE анализирует сигнал с выхода приемника локатора, определяет степень его достоверности и удаляет с факсимильной записи всю засветку, не соответствующую полезному сигналу, независимо от ее происхождения и местоположения на записи. На рис. 2, б показана очищенная факсимильная запись этого же сигнала. На ней удалены как шумовая засветка, так и полоса от переходных процессов. С таким же успехом программа удаляет с записи и отражения от местных предметов так называемые «местники».

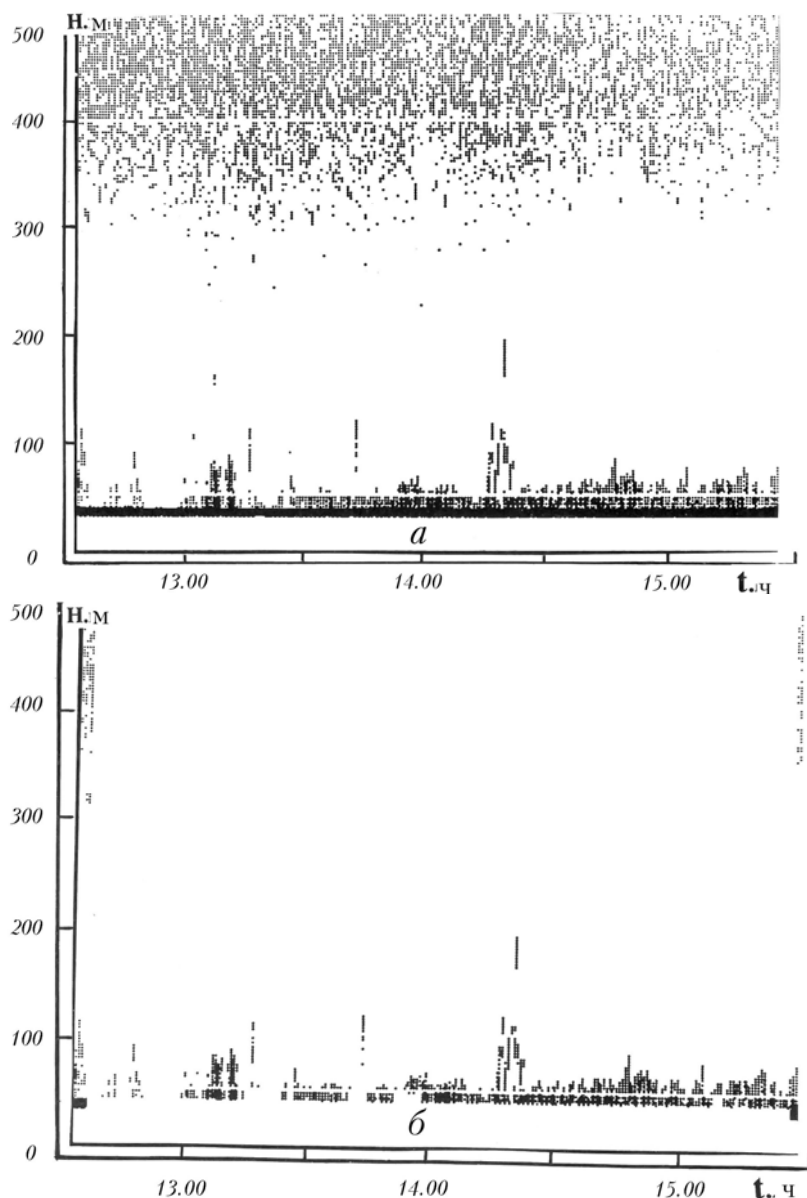


Рис. 2. Очистка факсимильных записей эхосигнала от шумовых помех: *а* — исходная запись, *б* — очищенная запись

Программа FAXTOOLS.EXE способна также определять по характеру принятого сигнала толщину слоя перемешивания (рис. 3). Как и в предыдущем примере, для демонстрации выбран один из «неудобных» для интерпретации файлов, записанный в условиях сильной конвекции.

На рис. 3, *а* приведена факсимильная запись сигнала, на которой видны характерные конвективные «перья», поднимающиеся до высоты 250 м. На рис. 3, *б* приведена та же запись с выделенным программой FAXTOOLS.EXE объемом, в котором наиболее интенсивно происходит перемешивание воздушных масс. Остальное пространство закрашено «песочной» штриховкой. Штриховка — это один из режимов программы, примененный здесь для наглядности. В реальной работе более удобно применять режим, при котором граница слоя перемешивания очерчивается сплошной линией. Толщина слоя перемешивания записывается в файл и хранится на магнитном диске ЭВМ. Специальный алгоритм позволяет определить толщину слоя перемешивания в условиях сильно флуктуирующего сигнала, в шумах и т.п. Алгоритм, используемый в программе FAXTOOLS.EXE, не требует предварительного набора статистической информации о шуме, «местниках» и т.п.

Акустический локатор «Звук-1» прошел испытания и показал достаточную надежность и удобство в эксплуатации. Он определяет тип стратификации (класс устойчивости атмосферы), высоту слоя перемешивания, высоты и мощность температурных инверсий, структурную характеристику поля температуры. Один экземпляр локатора передан в 1990 г. в центр по гидрометеорологии и охране окружающей среды г. Кемерово. Другой — ведет регулярную работу в программе Института оптики атмосферы СО РАН SATOR, направленной на изучение атмосферного озона и других газовых компонентов воздуха.

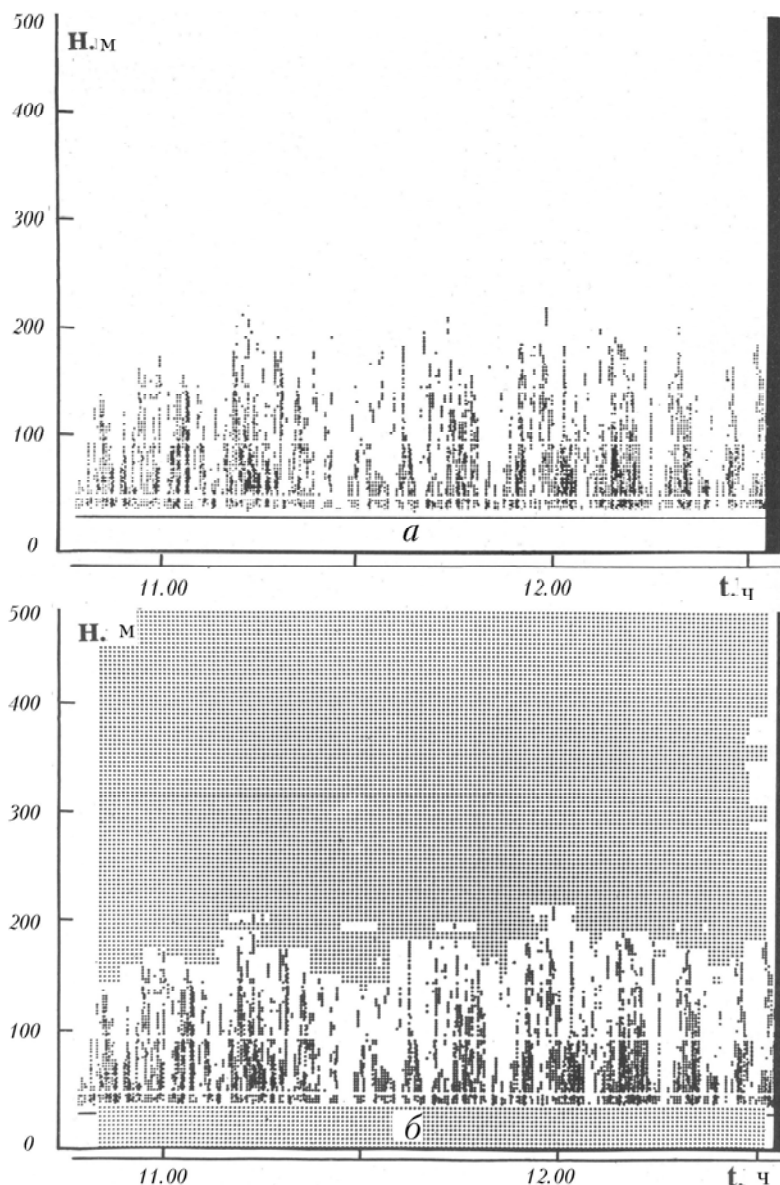


Рис. 3. Выделение на факсимильной записи эхосигнала слоя перемешивания примесей: *a* — записанный лоатором эхо-сигнал; *б* — незаштрихованная область — выделенный лоатором слой перемешивания примесей в атмосфере

1. Strand O. N. // J. Acoust. Soc. Am. 1971. V. 49. № 6. Part I. P. 1698—1703.
2. Adekola S. A. // J. Acoust. Soc. Am. 1976. V. 60. № 1. P. 230—239.
3. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974. 368 с.
4. Тюлин В. Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. М.: Наука, 1976. 256 с.
5. Римский-Корсаков А. В. Электроакустика. М.: Связь, 1973. 272 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
5 мая 1992 г.

V. A. Gladkikh, V. I. Karpov, N. P. Krasnenko, B. N. Molchanov,
M. G. Fursov. **An Acoustic Soudar «ZVUK-1»: New Approach to Constructing the Facility**

Based on the experience of using the meteorological sodars generalized specifications of these facilities are formulated. A commercial version of a sodar developed at the Institute of Atmospheric Optics Siberian Branch of the Academy of Sciences of Russia is presented. Software and its capabilities to process the sodar data are discussed. A sodar «SVUK-1» is capable of acquiring information on temperature stratification on the boundary atmospheric layer up to 500 m height. The structure constant of the atmospheric temperature field can be measured and also the certainty of data assessed using the SNR ratio.