

С.И. БАБКИН, канд. техн. наук, И.А. ДЕЛОВ, канд. техн. наук,  
Е.Г. ПРОШКИН, д-р техн. наук

## КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ СОВМЕЩЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ И АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ

Среди методов дистанционной регистрации вертикальных профилей температуры воздуха (радиолокационный, лидарный, акустический) наиболее точным является метод радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы. Связанные с ним основные методические вопросы (состав аппаратуры, наличие методики зондирования и обработки данных, оценка точности измерения температуры методом РАЗ и др.) практически решены, что позволяет использовать аппаратуру температурного РАЗ для геофизических исследований. В то же время продолжается работа по повышению точности регистрации вертикальных профилей температуры методом РАЗ, что вызвано требованиями геофизиков. Например, при исследовании микроструктуры теплых адвективных туманов погрешность измерения температуры воздуха не должна превышать 0,01 К.

Теоретическая оценка точности измерения скорости звука в атмосфере доплеровским радиолокатором [1] свидетельствует о том, что инструментальная погрешность измерения температуры воздуха аппаратурой РАЗ определяется в основном кратковременной нестабильностью частоты радиопередатчика и при обычной схемотехнике изготовления радиолокатора находится в пределах 0,1...0,3 К. Однако уже первые результаты регистрации высотного распределения температуры в пограничном слое атмосферы с помощью 10-сантиметровой системы РАЗ [2] выявили сильную изменчивость вида профилей, которая оказалась неожиданностью для метеорологов. В работе [2] показано, что при измерениях температуры метеодатчиками высотной метеомачты и системой РАЗ среднеквадратические отклонения результатов измерения температуры сравнимаемыми средствами лежат в пределах  $\pm 0,5$  К, что заметно отличается от инструментальной погрешности.

Скорость звука  $C$ , м/с, в атмосферном газе

$$C = A\sqrt{T} + v, \quad (1)$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от влажности воздуха,  $m/(cK^{1/2})$ ;  $T$  — абсолютная температура, К;  $v$  — проекция скорости ветра на направление распространения зондирующего звука, м/с. Как следует из формулы (1), неопределенность в значениях  $A$  и  $v$  (при вертикальном зондировании  $v$  представляет собой вертикальную составляющую скорости ветра) служит источником методической погрешности измерения температуры методом РАЗ при каждом единичном зондировании. Оценки погрешностей, вносимых этими величинами, свидетельствуют [3], что максимальная погрешность за счет неучета влажности достигает 2,26 К, а каждый 1 м/с в значении скорости ветра дает погрешность 1,68 К. Фактически фиксируются не только флуктуации температуры воздуха, но и флуктуации его влажности и скорости вертикальных потоков. Именно этим обстоятельством можно объяснить сильную изменчивость профилей температуры, регистрируемых методом РАЗ.

Рассмотрим некоторые профили температуры воздуха, зарегистрированные 20-сантиметровой системой РАЗ в приморском тумане (район г. Одессы) на разных стадиях его развития 28.03.85 с 14 до 19 ч по местному времени. Рис. 1, *а* соответствует стадии возникновения тумана, рис. 1, *б* — существования, рис. 1, *в* — разрушения.

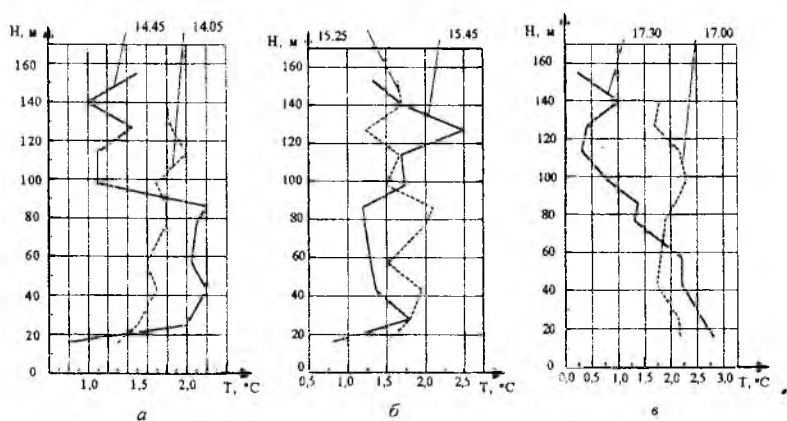


Рис. 1

Проанализировав представленные профили, можно предположить, что их вид определяется структурой теплового адвективного тумана, в котором эти профили были зарегистрированы: наблюдалось большое количество отдельных клочьев тумана, переносимых порывистым ветром (скорость

4...9 м/с). Очевидно, что такая структура и вызывает сильную изменчивость профилей, полученных РАЗ в этих условиях, хотя истинный профиль температуры воздуха может иметь и несколько другой вид. Сложности возникают при точном определении верхней границы температурной инверсии, в районе которой (по данным РАЗ) образуется заметная область, где температура регистрируется с большой дисперсией (последнее может быть вызвано повышенной турбулентностью на границе инверсии).

Давно созрела идея комплексирования (совмещения) средств дистанционного зондирования, особенно в отношении средств, использующих акустические волны. Однако о результатах действительного комплексирования авторам ничего не известно. Например, в работах [4; 5] описаны попытки комплексирования системы температурного РАЗ и содара. На практике все свелось к совмещению результатов раздельного (в силу технических причин) зондирования атмосферы этими средствами. Истинное комплексирование, под которым нами понимается совмещение процесса зондирования комплекслируемыми средствами во времени и пространстве, может быть реализовано лишь в том случае, когда акустический зондирующий импульс является целью для доплеровского радиолокатора системы РАЗ и он же рассеивается (в режиме обратного рассеяния) на температурных неоднородностях атмосферы. В описанных условиях один и тот же объем атмосферы, который занимает акустический импульс, формирует и электромагнитный, и акустический огражденные сигналы, что позволяет получать разнородную взаимодополняющую информацию об этом объеме. Технические трудности такого комплексирования заключались в необходимости подстройки опорного звукового генератора для поддержания условия Брэгга (для работы акустического излучателя в системе РАЗ) и одновременного поддержания высокой стабильности колебаний данного генератора (для работы доплеровского содара в режиме измерения скорости ветра), а также синхронной перестройки отдельных узлов приемника содара. Кроме того, в программе обработки содарных данных необходима соответствующая вариация параметров рабочей формулы расчета скорости ветра.

Для снижения неопределенности в регистрации высотного распределения температуры воздуха методом РАЗ, возникающей за счет вертикальной составляющей скорости ветра, разработана комплексированная система вертикального зондирования. Структурная схема комплекса аппаратуры показана на рис. 2. Этот комплекс включает в себя систему РАЗ температурного зондирования (блок 1), акустический локатор для измерения скорости вертикальных потоков (блок 2) и блок 3 обработки и представления данных на базе ПК. Доплеровский радиолокатор системы РАЗ работает на

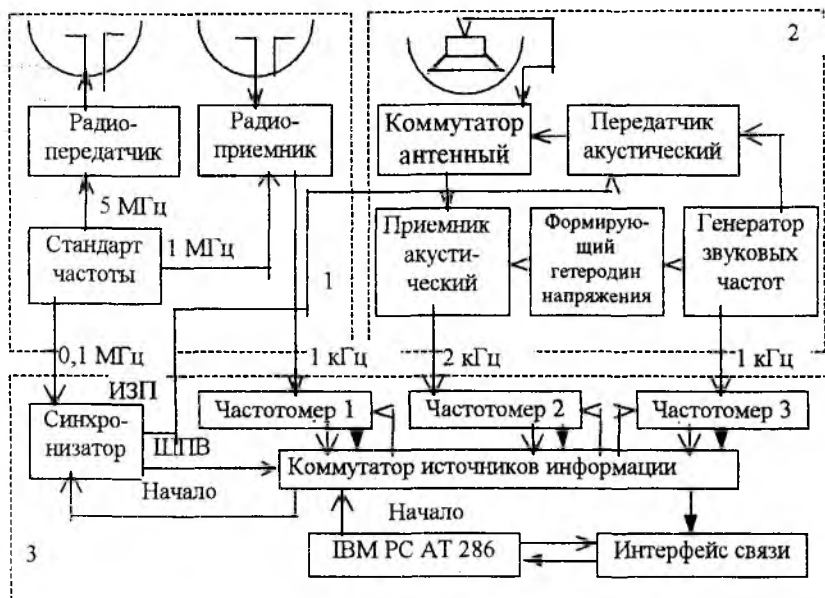


Рис. 2

частоте 440 МГц. Радиопередатчик функционирует в соответствии с принципом переноса стабильных высокочастотных колебаний опорного (стандарт частоты) генератора в СВЧ-диапазон; выходная электрическая мощность передатчика — 5 Вт. Чтобы обеспечивалась возможность регистрации вертикальных профилей температуры воздуха в нижней части пограничного слоя, передатчик радиолокатора работает в режиме непрерывного излучения волн. В состав радиоприемника с “нулевой” промежуточной частотой входят антенный усилитель радиочастоты, двухдиодный смеситель и усилитель доплеровской частоты; чувствительность приемника в полосе 300 Гц составляет около 1 мкВ. Средняя рабочая частота акустического локатора равна 1 кГц. Электрическая мощность акустического передатчика — 100 Вт, режим работы — импульсный (длительность импульса составляет 70 мс). Приемник содара построен по известному принципу стабилизации промежуточной частоты. Чувствительность акустического приемника составляет 0,5 мкВ в полосе частот 20 Гц. Антенное устройство комплекса включает в себя передающую и приемную антенны радиоканала, разнесенные на расстояние 5 м и экранированные друг от друга, а также приемно-передающую акустическую антенну с защитной шахтой, которая размещена между антеннами радиоканала. В качестве антенн для обо-

их докаторов использованы длиннофокусные параболические зеркала диаметром 1,8 м. В блок обработки данных входят, кроме компьютера РС АТ 286, коммутатор источников информации (три частотомера), интерфейс связи с компьютером и синхронизатор. Синхронизатор блока обработки позволяет задавать период зондирования (2 с), шаг регистрации информации по высоте — через 34 м при температурном РАЗ и через 17 м при акустическом зондировании, а также очередность передачи данных зондирования от источников информации к ПК.

Комплексированное зондирование с помощью описанной системы включает в себя: излучение (по сигналу синхронизатора ИЗП-импульса запуска передатчика) акустического импульса; прием отраженного от него электромагнитного сигнала и части энергии этого импульса, рассеянной на температурных неоднородностях атмосферы; выделение доплеровских сдвигов частоты принятых радио- и акустических сигналов; измерение (по сигналу синхронизатора ШПВ — шага по высоте) их мгновенного значения; вычисление вертикальной составляющей скорости ветра по данным акустического зондирования; расчет скорости звука по данным РАЗ; введение в полученное значение скорости звука поправки, учитывающей вертикальную составляющую скорости ветра; вычисление единичного значения температуры воздуха. Такой расчет производится для всех высотных уровней; при этом осуществляется согласование высот акустического и радиоакустического зондирования. Высоты регистрации при акустическом и радиоакустическом зондированиях определяются по формулам

$$H_{\text{РАЗ}} = (T_3 K - \tau_3 + T_{\text{из}}/2) C_1 / 2; \quad (2)$$

$$H_{\text{РАЗ}} = ((\tau_{\text{н}} + \tau_{\text{изм}}) / 2 + \tau_3 (N - 1)) C_1, \quad (3)$$

где  $T_3$  — период зондирования;  $K$  — номер уровня зондирования;  $\tau_3$  — время задержки акустического импульса;  $T_{\text{из}}$  — время измерения доплеровского сдвига акустического сигнала;  $C_1$  — приземная скорость звука;  $\tau_{\text{н}}$  — временная длительность акустического импульса;  $\tau_{\text{изм}}$  — время измерения доплеровского сдвига радиоакустического сигнала;  $N$  — номер уровня зондирования.

Для разработанной аппаратуры значения технических параметров и параметров зондирования следующие:  $T_3 = 0,1$  с;  $\tau_3 = 0,03$  с;  $T_{\text{из}} = \tau_{\text{изм}} = 0,01$  с;  $\tau_{\text{н}} = 0,07$  с. Поэтому различие в уровнях высот акустического и радиоакустического зондирований составляет не более 0,85 м.

Отработка данной методики в условиях натурального эксперимента показала, что она применима в тех условиях комплексированного зондирования, когда по всем высотным регистрируемым уровням имеются достаточные как акустический, так и радиоакустический отраженные сигналы. При развитии и существовании температурной инверсии эти условия выполняются только для области в районе верхней границы инверсии.

**Список литературы:** 1. Бабкин С.И. О точности измерения скорости звука в атмосфере доплеровским радиолокатором // Радиотехника. 1979. Вып. 50. С. 67 — 72. 2. Некоторые результаты измерения температуры воздуха системой радиоакустического зондирования / С.И. Бабкин, Е.Г. Прошкин, Ю.Н. Ульянов и др. // Тр. 5-го Всесоюз. совещ. по радиометеорологии, Кишинев, 15 — 19 мая 1978 г. М., 1981. С. 281 — 284. 3. North E.M., Peterson A.M., Perry H.D. RASS, a remote sensing system for measuring low-level temperature profiles // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1973. Vol. 4, N 9. P. 912 — 919. 4. Петенко И.В., Шурыгин Е.А. Радиосодарный комплекс для дистанционных синхронных измерений скорости ветра, температуры и ее флуктуаций // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20, № 8. С. 771 — 773. 5. Андрианов В.А., Панченко А.Ю. Восстановление высотных профилей показателя преломления пограничного слоя атмосферы по акустическим и радиоакустическим дистанционным измерениям // Радиотехника и электрон. 1990. Т. 35, № 12. С. 2518 — 2526.

*Харьковский государственный технический  
университет радиозлектроники*

*Поступила в редколлегию 30.07.98*