

УДК 621.371

С. И. БАБКИН, канд. техн. наук, *В. И. КУЦЕНКО*, *Н. Г. МАКСИМОВА*,
А. Ю. ПАНЧЕНКО, *Е. Г. ПРОШКИН*, канд. техн. наук, *Ю. Н. УЛЬЯНОВ*

**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ДВУХ МЕТОДИК РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО
ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ. СООБЩЕНИЕ 1.
РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

В основе дистанционного измерения температуры воздуха вертикальным радиоакустическим зондированием (РАЗ) атмосферы лежит зависимость скорости звука от температуры воздуха, определяемая по формуле Лапласа

$$c = \sqrt{\gamma \frac{D}{\rho}}, \quad (1)$$

где D — упругость воздуха; ρ — плотность; χ — отношение теплоемкостей воздуха при постоянном объеме C_V и постоянном давлении C_P .

Скорость звука в реальной атмосфере при вертикальном зондировании определяется атмосферным давлением, температурой и влажностью воздуха, а также вертикальной составляющей скорости ветра. Скорость звука можно вычислить по формуле

$$C = \frac{C_0}{15,53} \sqrt{\frac{1}{1 - 0,378 \frac{e}{p}} \frac{1 + \frac{\chi_1 - \chi_2}{\chi_1(\chi_2 - 1)} \frac{e}{p}}{\frac{\chi_1 - \chi_2}{\chi_2 - 1} \frac{e}{p}}} + V_B. \quad (2)$$

Здесь C_0 — скорость звука в сухом воздухе, нормальном давлении и температуре 273,15 К; e, p — давление водяного пара и сухого воздуха; χ_1, χ_2 — теплоемкость сухого воздуха и водяного пара; V_B — вертикальная составляющая скорости ветра.

При отражении звуковых волн радиоволнами возникает доплеровский сдвиг частоты отраженных радиосигналов $F_d = 2c/\lambda$, где λ — длина радиоволны.

Измеряя возникающий сдвиг частоты, дистанционно определяем температуру воздуха на некоторой заданной высоте

$$T = \left(\frac{F_d \lambda}{20,0769 a} \right)^2. \quad (3)$$

Здесь a — подкоренное выражение формулы (2).

При исследованиях микроструктуры туманов и условий распространения ультракоротких волн в тропосфере наибольший интерес представляет предельная случайная погрешность измерения температуры воздуха. Эта погрешность определяется аппаратурой и методикой РАЗ атмосферы, применяемой для регистрации вертикальных профилей температуры. Анализ источников инструментальной погрешности при измерении температуры воздуха методом РАЗ выполнен в работе [1].

Сравним величины случайной погрешности, имеющие место при использовании различных методик регистрации вертикальных профилей температуры воздуха радиоакустическим зондированием атмосферы. Такое сравнение проводили на основе анализа обширного экспериментального материала.

Рассмотрим методическую разработку эксперимента. Для регистрации профилей температуры методом вертикального РАЗ атмосферы необходимо измерять доплеровский сдвиг частоты радиосигналов, отраженных от пакета звуковых волн, последовательно проходящего вертикально вверх, зондируемые слои атмосферы. При этом возможны две методики регистрации вертикального профиля температуры.

Первая из них («трасса») включает излучение пакета звуковых волн и регистрацию через равные интервалы времени величину доплеровского сдвига частоты по мере распространения пакета звуковых волн по трассе зондирования [2]. Зондирование по данной методике проводится за время, принятое для усреднения полученных результатов (2, 3, 5, 10 мин). Использование этой методики затрудняется спецификой метода РАЗ, заключающейся в том, что условие максимального отражения, когда длина звуковых волн в два раза меньше длины радиоволн, при значительном вертикальном градиенте температуры воздуха выполняется лишь в некотором, достаточно тонком (30—50 м) слое атмосферы. Изменение квадрата коэффициента отражения радиосигналов по мощности пропорционально функции $(\sin x/x)^2$, где x определяется количеством волн в звуковом пакете. Поэтому вторая методика («точка») предполагает выполнение оптимального соотношения длин звуковых и радиоволн сначала на низкой высоте, проведение некоторого заданного числа зондирований атмосферы, измерение доплеровского сдвига частоты и последующий расчет усреднения результатов измерения температуры на этой высоте. Затем производится согласование длин волн изменением зондирующей звуковой частоты на следующей высоте

и операции повторяются. Такая последовательность действий выполняется до получения всего вертикального профиля температуры воздуха [2; 3].

Для исследования погрешности измерения температуры воздуха этими методиками в целях дальнейшего сравнения точности и оперативности регистрации вертикальных профилей температуры методом РАЗ использовали дециметровую систему радиоакустического зондирования [4]. В состав используемой в экспериментах системы РАЗ входят доплеровская радиолокационная станция, содержащая формирователь опорных частот, радиопередающее устройство, радиоприемное устройство, генератор звуковых волн, антенно-фидерное устройство, а также блок обработки и регистрации данных зондирования. Принцип формирования узкополосного спектра выходного колебания радиопередатчика используется тот же, что и в ранее описанной 10-сантиметровой системе [1; 2]. Транзисторно-варакторный тракт радиопередающего устройства обеспечивает получение 3 Вт выходной мощности на частоте 1500 МГц. Основными блоками радиоприемного устройства являются проходной транзисторный усилитель и супергетеродинный приемник с тройным преобразованием частоты, выделяющий доплеровский сдвиг частоты, несущий полезную информацию. Для компенсации сигнала, просачивающегося на вход приемника через антенны от радиопередатчика (доплеровский радиолокатор работал в режиме непрерывного излучения радиоволн), часть выходной мощности через плавный аттенюатор и фазовращатель подавалась на вход приемника. При точном подборе амплитуды и фазы этого сигнала удалось почти полностью компенсировать просачивание, что позволило реализовать усиление приемника. Коэффициент усиления приемника лежит в пределах 10^4 — 10^5 , полоса пропускания составляет 300 кГц. На акустический излучатель, содержащий четыре модуля (каждый модуль составлен из 16 громкоговорителей 6 ГД-13), от генератора звуковых импульсов подавалась электрическая мощность около 600 Вт при средней звуковой частоте 3,5 кГц. Антенно-фидерное устройство радиоканала системы РАЗ состоит из параболических передающей и приемной антенн, акустического излучателя, размещенного между ними. Все три устройства смонтированы на жесткой металлической ферме, расстояние между центрами антенн радиоканала равно 3,6 м. Акустический излучатель размещен на площадке тележки, перемещаемой для компенсации сдвигающего действия на пакет звуковых волн горизонтального ветра вдоль направляющих рельсов; направляющие рельсы ориентированы перпендикулярно к основной металлической ферме. Управление перемещением подвижной тележки осуществляется из кузова с аппаратурой РАЗ при помощи пульта управления двигателем; одновременно производится индикация местоположения тележки. Ориентация антенно-фидерного устройства при изменении направления приземного ветра осуществляется поворотом кабины в целом. Блок обработки содержит, кроме индикатора дальность—амплитуда и частотомера, специализированное вычислительное устройство (СВУ) «Электроника ДЗ-28», цифropечатающее устройство МПУ 16-2 и устройство связи СВУ с периферией. Вычислительное устройство управляет режимом зондирования, устанавливая период зондирования, длительность зондирующего импульса, количество отсчетов на каждом уровне и число таких уровней по высоте. Применение СВУ позволило проводить получение информации о высотном распределении температуры воздуха практически в реальном масштабе времени. Аппаратура дециметровой системы РАЗ смонтирована в поворотном кузове на платформе автомобильного прицепа (размеры кузова $2400 \times 2200 \times 1500$ мм).

Натурный эксперимент по опробованию описанных методик температурного РАЗ атмосферы проводился на экспериментальном метеорологическом полигоне (ЭМП) Одесского гидрометеорологического института. Метеодатчики ЭМП позволяют получать информацию о пространственно-временной изменчивости основных метеовеличин (до высоты 16,5 м). Данные приземных измерений температуры влажности воздуха использовались для расчета высоты зондирования и поправки результатов измерения температуры на реальные значения влажности воздуха.

При разработке алгоритма вычисления температуры воздуха по данным РАЗ атмосферы учитывали следующие факторы. Измерение температуры воздуха методом РАЗ осуществляется косвенным методом с нелинейной связью температуры воздуха с доплеровским сдвигом частоты отраженных от пакета

зондирующих звуковых волн радиосигналов. Математический аппарат статистической обработки результатов наблюдений детально разработан только для косвенных измерений с линейной зависимостью. Для косвенных измерений при нелинейной связи между величиной и аргументом не всегда возможно найти точное аналитическое выражение для распределения погрешностей результата. Однако для большинства косвенных измерений с нелинейной зависимостью разработаны методы обработки результатов наблюдений. В частности, для статистической обработки результатов измерения периода доплеровской частоты при определении температуры воздуха следует использовать метод приведения, так как он пригоден для обработки результатов наблюдений при изменяющемся аргументе. Поэтому для дистанционного определения температуры воздуха методом РАЗ необходимо выполнить прямое определение периода доплеровской частоты и вычислить значение температуры. Выполняя некоторое число таких операций для заданной высоты получают статистический ряд, который можно рассматривать как группу результатов наблюдений при прямых измерениях и обрабатывать по известной методике.

Для регистрации вертикального распределения температуры воздуха в реальном масштабе времени для используемого в системе РАЗ специализированного вычислительного устройства разработан алгоритм реализации методики «трасса», структурная схема которого представлена на рис. 1. Эта программа позволяет получить следующие статистические характеристики температуры: среднее значение температуры T ; дисперсию флюктуаций температуры σ_T^2 ; средний квадрат T^2 и средний куб T^3 температуры за выбранное время усреднения (в метеорологии применяется 2-, 3-, 10- и 15-минутные усреднения).

Чтобы исключить зависимость времени зондирования от размеров памяти используемого СВУ «Электроника ДЗ-28», программа построена так, что расчет температуры по полученным значениям периода доплеровской частоты ведется сразу по рабочей формуле

$$T = \left(\frac{\lambda}{40,116} \right)^2 \frac{1}{\tau_d^2} \frac{1}{\sin^2 \left[\arctg \left(\frac{20,0528 \sqrt{T_{\text{пр}} \tau_d}}{b} \right) \right]} - \left[0,3 + \frac{0,16 (30 - H_{\text{пр}})}{7} \right], \quad (4)$$

где τ_d — период доплеровской частоты; $T_{\text{пр}}$ — приземное значение температуры; $H_{\text{пр}}$ — приземное значение влажности; τ_a — время задержки частотомера; b — половина расстояния между антеннами радиоканала, $b=1,8$ м. Второе слагаемое выражения (4) представляет собой поправку рассчитанного значения температуры на реальное значение влажности [5]. В результате расчета T получим суммы ΣT , ΣT^2 , ΣT^3 для каждого уровня регистрации температуры. При зондировании приземного слоя толщиной 500 м с пространственным разрешением 10 м количество уровней зондирования составляет 50, а необходимый объем памяти для размещения входных и выходных данных не превышает 2 Кбайт независимо от количества поступившей информации за выбранное время усреднения. По окончании поступления информации производится усреднение T , T^2 , T^3 с последующим вычислением σ_T^2 по каждому уровню. Данные вычислений затем выводятся на печать.

Рассмотренный алгоритм позволяет получать информацию о вертикальном распределении температуры воздуха в реальном масштабе времени. Для накопления числового массива большого объема в полевых условиях и последующей обработки его в лабораторных условиях разработан алгоритм, представленный на рис. 2. В этом случае полученная информация записывается на магнитную ленту. При построении вертикальных профилей температуры вычисления ведутся по алгоритму расчета статистических характеристик температуры с тем отличием, что ввод с частотомера (позиция 9 на структурной схеме алгоритма рис. 1) заменяется вводом данных с магнитной ленты.

В целях реализации методики «точка» разработан алгоритм, структурная схема которого представлена на рис. 3. Во время работы по данному алгоритму СВУ осуществляет накопление данных зондирования, вычисление среднего значения температуры и ее среднеквадратического отклонения, средние значения и средне-

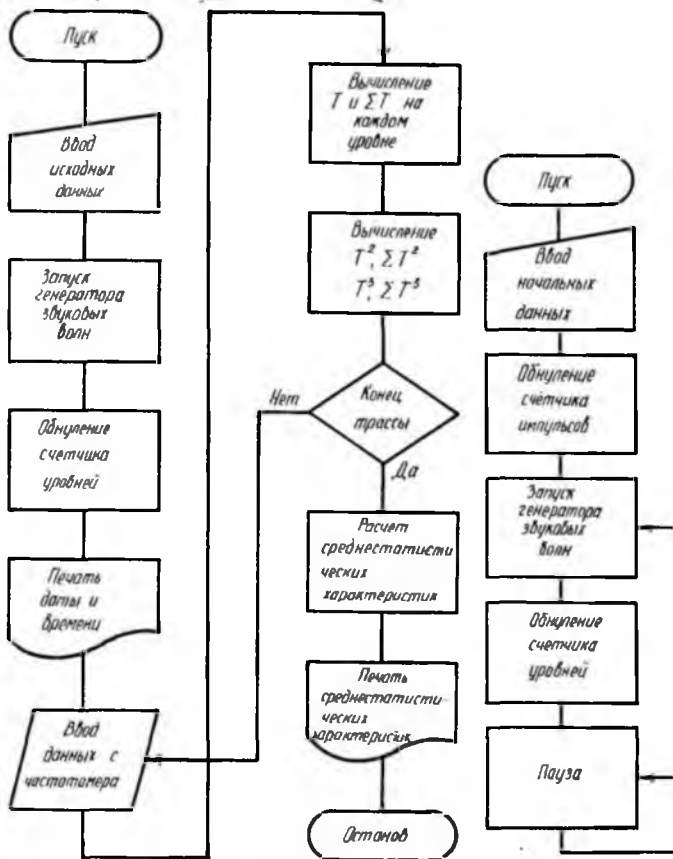


Рис. 1

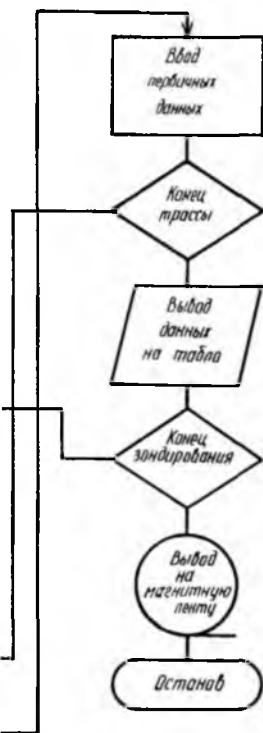


Рис. 2

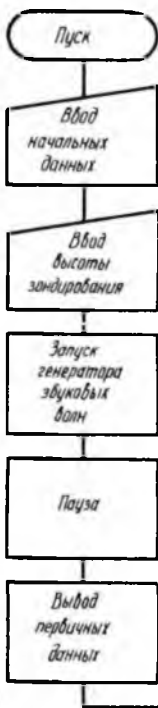
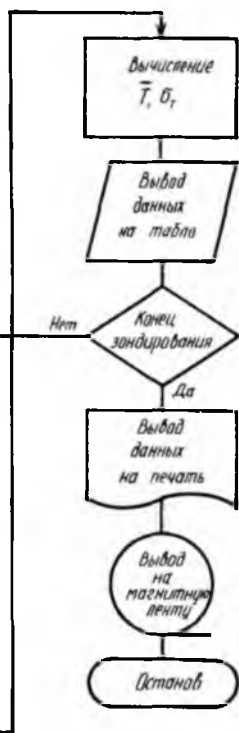


Рис. 3



квадратическое отклонение периода доплеровской частоты. Считывание информации производится с одной точки на трассе зондирования. При этом время задержки между окончанием звуковой посылки и запуском частотомера задается оператором. На табло СВУ осуществляется индикация текущей температуры и количества зондирующих импульсов. После индикации оператор имеет возможность вмешиваться в ход выполнения программы, разрешая либо ввод новых данных, либо вывод всей накопленной информации на магнитную ленту. Вызвано это необходимостью перемещения акустического излучателя во время паузы для компенсации горизонтального ветра на зондирующий пакет звуковых волн.

Оценим случайную погрешность вычисления температуры воздуха по выражению (4) с учетом применяемой радио и метеорологической аппаратуры для обеспечения натурального эксперимента. Обозначив второе слагаемое в выражении (4) через $A(H) = 0,3 + 0,16(30 - H)/7$, запишем среднеквадратическую погрешность расчета температуры, обусловленную инструментальной погрешностью используемой аппаратуры в виде

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \lambda} \sigma_\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \tau_d} \sigma_{\tau_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial T_{\text{пр}}} \sigma_{T_{\text{пр}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \tau_3} \sigma_{\tau_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial H} \sigma_H\right)^2}. \quad (5)$$

Частные производные по каждому параметру:

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda} = \frac{2[T + A(H)]}{\lambda}; \quad \frac{\partial T}{\partial \tau_d} = -\frac{2[T + A(H)]}{\tau_d}; \quad \frac{\partial T}{\partial H} = 0,022;$$

$$\frac{\partial T}{\partial T_{\text{пр}}} = \frac{T + A(H)}{T_{\text{пр}} \left[1 + \left(\frac{R}{b}\right)^2\right]}; \quad \frac{\partial T}{\partial \tau_3} = -\frac{2[T + A(H)]}{\tau_3 \left[1 + \left(\frac{R}{b}\right)^2\right]}. \quad (6)$$

В натурном эксперименте использовали кварцевый термостабилизированный генератор опорной частоты системы РАЗ с относительной нестабильностью $2 \cdot 10^{-9}$, частотомер ЧЗ-34А, ртутный термометр для измерения приземной температуры, кварцевый генератор с относительной нестабильностью 10^{-7} для измерения времени задержки, сорбционный гигрометр ГС-210 для измерения приземного значения относительной влажности. Согласно вышеизложенному рассчитываем случайную погрешность измерения температуры воздуха методом и аппаратурой РАЗ в диапазоне температур от -20°C до 30°C . Для этих условий $\sigma_T = 0,11$ К и зависит от применяемой методики температурного зондирования.

Список литературы: 1. Бабкин С. И. О точности измерения скорости звука в атмосфере доплеровским радиолокатором//Радиотехника. — 1979. — Вып. 50. — С. 67—72. 2. Бабкин С. И., Прошкин Е. Г., Ульянов Ю. Н. Экспериментальные результаты температурно-ветрового зондирования атмосферы радиоакустическим методом//Изв. АН СССР. Физико-астрономич. обсерватория. — 1984. — 20, № 6. — С. 495—500. 3. Каллистратови М. А., Кон А. И. Современный взгляд на метод радиоакустического зондирования атмосферы//VIII Всесоюз. симп. по лазер. и акуст. зондированию атмосферы//Тез. докл. Томск, 1984. — Ч. 2. — С. 82—91. 4. Ульянов Ю. Н. Двухчастотная радиоакустическая система//Тез. докл. Томск, 1984. — Ч. 2. — С. 196—199. 5. Harris C. M. Effect of Humidity on the Velocity of Sound in Air//J. of the Acoustical Society of America. — 1971. — 49, № 3 (Part 2). — P. 890—893.

Поступила в редколлегию 10.02.86