

**О НОВОМ ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ АЛГОРИТМА
РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ВОЗМУЩЕННЫХ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЯХ ПОГРАНИЧНОГО
СЛОЯ АТМОСФЕРЫ**

Леонидов В.И.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина 14, каф. Биомедицинских электронных систем
Тел. (057) 702 -13 -64, e-mail: bykh@kture.kharkov.ua ; факс(057) 702-11-13
Expediency of the use of the RAS-system as the system of the expert analysis of tempera-
ture's profile, created on statistical models, is grounded.

Введение. Проблемы динамической метеорологии, проведение разработок в области развития численных методов прогнозирования погодных условий, а также исследования причин глобального потепления климата планеты требуют организации массовых измерений профилей температуры атмосферного пограничного слоя (АПС) на сети метеорологических станций. Решить эту задачу возможно с помощью радиотехнических систем дистанционного зондирования АПС. Наиболее перспективным направлением в этой области является использование систем радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы.

Исходя из необходимости создания сети станций наблюдения, системы РАЗ должны обладать относительно небольшой стоимостью в производстве и эксплуатации. Такому требованию отвечают системы с мощностью P_t зондирующего радиосигнала $P_t \leq 20 \text{ Вт}$. Однако, как показывают результаты экспериментальных исследований, проведенных различными авторами при различных термодинамических состояниях АПС [1-2], системы РАЗ при $P_t \leq 20 \text{ Вт}$ обладают недостаточной функциональной надежностью при исследовании возмущенных термодинамических состояний АПС.

Целью настоящей работы является обоснование возможности определения профилей температуры при возмущенных состояниях АПС с помощью систем РАЗ.

Сущность. При $P_t \leq 20 \text{ Вт}$ обеспечить достаточный потенциал системы РАЗ возможно при акустическом волновом пакете с числом периодов $N > 100$. При этом максимум мощности радио-эхо-сигнала (РдЭС) наблюдается при выполнении волнового соотношения (ВС) $\lambda_e = 2\lambda_s \cdot \cos(\varphi)$, где λ_e и λ_s длины электромагнитной и акустической волн соответственно, φ - угол падения радиосигнала на акустический импульс. Так как $\lambda_s = (1/f_s) \cdot 20,06\sqrt{T_g}$, где f_s - частота заполнения акустического зондирующего импульса, и так как в общем случае температура воздуха $T_g = F(h)$, где h - высота, получим $\lambda_e(h) = 2 \cdot (1/f_s) \cdot 20,06\sqrt{T_g(h)} \cdot \cos(\varphi)$. Следовательно, при $\lambda_e = \text{const}$, как это имеет место в большинстве экспериментальных систем, возникает ошибка ВС $\Lambda = \lambda_e - 2\lambda_s \cdot \cos(\varphi)$, которая приводит к флуктуациям амплитуды и фазы РдЭС и, следовательно, к снижению функциональной надежности системы. В этом случае **необходимо определить величину методического допуска** (МД) системы РАЗ на диапазон изменения измеряемой величины - температуры воздуха, в пределах которого измерения могут быть проведены с известной погрешностью.

Для определения МД воспользуемся выражениями для относительного ослабления мощности РдЭС, которые, согласно [1-2] имеют вид: $P_r \sim I_0 \cdot N^2 \exp(-4\pi^2 N^2 \Lambda^2 \lambda_e^{-2})$ при огибающей акустического импульса в виде кривой Гаусса и $P_r = I_0 \cdot N^2 \cdot [\sin(x)/x]$ при прямоугольной огибающей акустического импульса, где $x = \pi N \Lambda / \lambda_e$, P_r - мощность РдЭС, I_0 - мощность РдЭС при $\Lambda = 0$. Численный анализ функций $P_r = F(\Lambda)$ относительно ар-

гумента ΔT - отклонения температуры от значения T_{est} , при котором ВС выполняется точно, то есть $\Lambda = \lambda_e - (1/f_s) \cdot 20,06 \sqrt{T_{est}(h) \pm \Delta T}$, дает зависимости, приведенные на рис. 1.

Если в качестве критерия пренебрежимо малых флуктуаций мощности РдЭС принять условие $\delta P_r = \frac{P_{rmax} - P_r}{P_{rmax}} \leq 5\%$, то, как следует из зависимости рис.1, МД будет находиться в пределах $\Delta T_{don} \cong \pm(0,1 \div 0,5)^\circ C$ при $N = 200$ и $\Delta T_{don} \cong \pm(0,19 \div 0,85)^\circ C$ при $N = 120$.

Видно, что МД системы соизмерим с полем достижимой погрешности измерений при невозмущенном АПС и значительно меньше изменения температуры, обусловленного стратификацией.

Расширить рабочий диапазон измерений можно с помощью системы АПЧ [2] излучаемого радиосигнала, что, однако, несколько увеличит погрешность за счет инертности системы АПЧ.

Так как система АПЧ не может компенсировать флуктуации температуры в области времен $t < \tau_s$. где τ_s - длительность акустического зондирующего импульса то, следовательно, вихри с линейным размером $\Delta h > l_T \geq \lambda_s$, где Δh - разрешающая способность по высоте, (микромасштабная турбулентность (ММТ)) возможно будут оказывать существенное влияние на амплитуду РдЭС.

Влияние ММТ на амплитуду РдЭС проанализируем методом имитационного моделирования. Положим СКО температуры воздуха, равным $\sigma_{T_e}[T_e'] = 1^\circ C$. Модель мощности РдЭС представим в виде суммы парциальных волн $P_{r\Sigma} = \left[\sum_{i=1}^N E_i \cdot \sin(2\pi f_e t + \varphi_0 + \varphi_i') \right]^2$,

где $\varphi_0 = 2\pi \frac{2h_0}{\lambda_e}$ - начальная фаза радио-эхо-сигнала, h_0 - «мертвая зона», φ_i' - фаза i -го РдЭС, содержащая случайную компоненту и ошибку ΔT , E_i - амплитуда напряженности поля парциальной волны, отраженной от i -го периода волнового пакета.

Вводя коэффициент эффективности суммирования парциальных волн по мощности $k_{ef} = \frac{P_{r\Sigma}}{P_{r0}} \leq 1$, где P_{r0} - мощность РдЭС при $\Lambda = 0$, и полагая $E_i = const$ получим выражение

$$k_{ef} = \frac{1}{N^2} \left\{ \sum_{i=1}^N \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda_e} \left(C_e t + 2h_0 + \sum_{p=1}^i 2 \frac{1}{f_s} 20,06 \sqrt{T_0 + \Delta T + T_{e'p}} \right) \right] \right\}^2,$$

где t - аргумент времени, T_0 - средняя температура воздуха в импульсном объеме, при которой УВС выполняется точно; ΔT - отклонение реального значения температуры в импульсном объеме от T_0 , $T_{e'i}$ - турбулентное отклонение температуры от T_0 на i -том периоде акустического волнового пакета в момент времени $t = t_i$, $i = (1, 2, \dots, N)$, $p = (1, 2, \dots, i)$. Полученное выражение проанализируем численно.

Результат анализа в виде зависимости рис.2 приводит к двум выводам:

- влиянием ММТ на амплитуду РдЭС можно пренебречь только в окрестностях точки $\Delta T = 0$ в пределах $\Delta T_{don} = \pm 0,2^\circ C$ и $\Delta T_{don} = \pm 0,25^\circ C$ при $N = 120$ $N = 200$ соответственно;

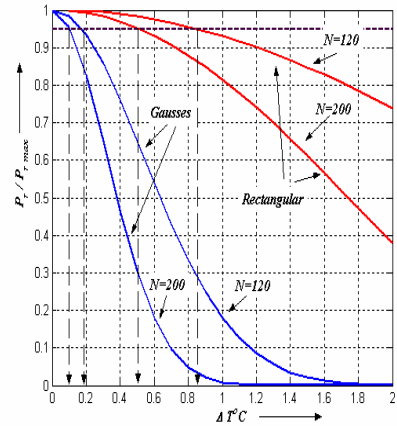


Рис. 1. Ослабление мощности РдЭС от ΔT

– рост ΔT при $\sigma_{T_e}[T'_e] = const$ сопровождается ростом $\tilde{\sigma}[k_{ef}]$.

Так как при расчете λ_e используется среднее по времени значение температуры \bar{T}_{it} воздуха в одной доступной для измерения точке высоты, например $h = 5 м$ и так как ВС поддерживается «мгновенным» средним значением температуры по импульсному объему \bar{T}_{V_i} , то практически всегда имеет место некоторая минимальная ошибка $\delta_T = \bar{T}_{it} - \bar{T}_{V_i} = \Delta T_{min}$.

Другим фактором роста ΔT является величина ММТ пульсаций температуры вдоль трассы зондирования (высоты).

В работе [3] приведено описание контактных измерений величины ММТ пульсаций температуры на метеобашне высотой 75м. В результате было показано, что при возмущенных состояниях АПС в поле температуры возникают импульсы температуры, продолжительностью $t_c = 10 с \div 2 мин$ и амплитудой $T' = (0,2 \div 0,6)^\circ C$. Внутри этих импульсов наблюдаются флуктуации порядка $T' = (0,05 \div 0,5)^\circ C$ с минимальным временем нарастания 50мс. Во время «спокойных» периодов между импульсами ММТ флуктуации на температурной записи отсутствуют. При возникновении слоистых структур или инверсий температуры со сдвигом ветра пульсации температуры составляют $T' \cong 1^\circ C$.

Следовательно, при возмущенных состояниях амплитуда турбулентных пульсаций температуры составляет $T' \cong 1^\circ C$, что значительно превышает полученный допуск $\Delta T_{don} = \pm(0,2 \div 0,25)^\circ C \ll T'$ и, следовательно, влиянием ММТ на амплитуду РдЭС нельзя пренебречь. Таким образом, применение системы АПЧ при возмущенных состояниях АПС не может быть эффективным, так как в этом случае имеет место либо потеря информативности, либо срыв АПЧ (промахи в измерениях).

Полученное соотношение $\Delta T_{don} \cong \delta T \ll T'$ фактически означает, что для обеспечения устойчивого приема эхо-сигнала и расчета погрешности измерений необходимо, чтобы искомый профиль температуры был априорно известен. Такое противоречие можно разрешить, выдвинув априорную гипотезу $H[T_u(h)]$, состоящую в том, что реализация истинного профиля температуры $T_{au}(h)$ в данный момент времени принимает вид его априорной оценки $\tilde{T}_{au}(h)$. Далее рассчитывается зависимость $\lambda_e(h) = 2 \cdot C_s \cdot 1/f_s = 2 \cdot 20,06 \sqrt{\tilde{T}_{au}(h)} \cdot 1/f_s$ или, $f_e(h) = C_e / \lambda_e(h) = C_e f_s / \left[2 \cdot 20,06 \sqrt{\tilde{T}_{au}(h)} \right]$. Функцию $f_e(h)$ представим в виде $f_e(h) = f_n \cdot \psi(h)$, где $\psi(h)$ - безразмерная непрерывная функция управления частотой (ФУЧ) радиопередатчика системы РАЗ, определенная на интервале высоты $h = h_{min} \div h_{max}$, f_n - масштабирующий множитель, имеет размерность частоты. Тогда получим $\psi(h) = C_e f_s / \left[f_n \cdot 2 \cdot 20,06 \sqrt{\tilde{T}_{au}(h)} \right]$.

Функция $\psi(h)$ определена на интервале времени равном периоду повторения T_n зондирующих импульсов и может быть использована для управления частотой радиопередатчика системы РАЗ в процессе зондирования.

При таком подходе система РАЗ выполняет функцию экспертной системы, в задачу которой входит проверка априорной гипотезы $H[T_u(h)]$.

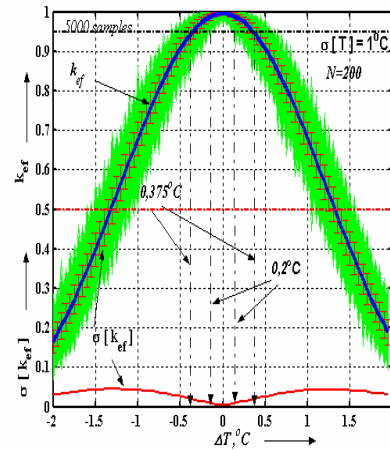


Рис. 2. Зависимости $k_{ef}(\Delta T)$ и $\tilde{\sigma}[k_{ef}]$ от ΔT

Оценка $\tilde{T}_{au}(h)$ может быть получена как реализация модели, разработанной для каждого из типов термодинамического состояния АПС. В этом случае необходимо классифицировать тип ТДС. Эта процедура может быть выполнена на основании анализа выборок эхо-сигналов акустического зондирования атмосферы [4,5].

Оценка $\tilde{T}_{au}(h)$ может быть получена только с некоторой ошибкой. Роль системы РАЗ состоит в том, чтобы по экспериментальным значениям $k_{ef}(h)$ и знаку доплеровского сдвига частоты РдЭС, используя зависимость рис.2, оценить величину этой ошибки.

Выводы. В результате проведенного исследования показано, что в условиях термодинамических возмущений в АПС система РАЗ не может выполнять функцию измерения температуры. Поскольку на возмущенные состояния приходится в среднем до 30% времени года, то потери информации в системах РАЗ оказываются значительными.

В работе также приведено обоснование нового подхода к построению алгоритма функционирования системы РАЗ, согласно которому система производит экспертную оценку профиля температуры, восстановленного с помощью статистических моделей, при этом погрешность восстановления определяется по данным РАЗ. Такой подход позволяет значительно расширить перечень погодных условий, при которых могут быть получены оценки профилей температуры.

Реализация рассмотренного подхода окажется весьма полезной в научных исследованиях по разработке моделей пограничного слоя атмосферы, включая и возмущенные состояния, модели которых в настоящее время все еще отсутствуют.

Для развития этого подхода в дальнейшем необходимо провести исследования в области разработки методов классификации типов термодинамических состояний АПС, например, по данным акустического зондирования, с целью получения априорных модельных оценок профилей температуры.

Литература

1. М.А. Каллистратова, А.И. Кон. Радиоакустическое зондирование атмосферы, М, «Наука», 1985, с 197.
2. А.Г. Горелик, В.Р. Жежерин, М.А. Каллистратова, Л.В. Князев, И.В. Петенко, П.О. Шишков, Е.А. Шурыгин. Радиоакустическое зондирование атмосферного пограничного слоя с автоподстройкой частоты. Метеорологические исследования, 1987, том 28, 82 – 92с.
3. Л.Г. Макалистер, А.Р. Махони, Д.Р. Поллард, П.Д.Р. Шоу. Акустическое зондирование – новый метод исследования строения атмосферы. //Тр. ИИЭР – 1968. - №4.- С.231-240.
4. Семенец В.В., Леонидов В.И. Методика акустического зондирования в задаче экологического контроля пограничного слоя атмосферы. Прикладная радиоэлектроника, №3, 2005, с.
5. Леонидов В.И. Усовершенствование комплексной системы радиоакустического и акустического зондирования пограничного слоя атмосферы. Прикладная радиоэлектроника Том 5, №2 2006, с 201-213.