

А.П. Ростов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ МЕТЕОСТАНЦИЕЙ

Исследуется мощность эхосигнала при моностатическом зондировании в надир в атмосфере случайно-неровной поверхности со сложной индикатрисой рассеяния элементарных локально-плоских участков. Получены аналитические выражения для средней принимаемой мощности, задержки и длительности эхоимпульса при зондировании в оптически плотной аэрозольной атмосфере поверхности с индикатрисой рассеяния, имеющей диффузную и квазизеркальную компоненты. Показано, что неровности поверхности могут приводить к существенному искажению формы эхоимпульса как в прозрачной, так и в оптически плотной атмосфере.

Турбулентные неоднородности воздуха создают случайную пространственно-временную структуру поля показателя преломления атмосферного воздуха. Эта структура подвержена динамичным локальным возмущениям при изменениях текущей погодной ситуации. Поэтому результаты многих работ, производимых с использованием оптических приборов, могут быть состоятельными лишь в том случае, если они обработаны с учетом турбулентности атмосферы.

В широком интервале пространственных частот флуктуации диэлектрической проницаемости единственной характеристикой этого процесса является параметр

$$C_T^2 = C_\epsilon^2 / K_{\epsilon T}^2 \quad (1)$$

– структурная характеристика флуктуации температуры [1], C_ϵ – структурная характеристика флуктуации диэлектрической проницаемости; $K_{\epsilon T} = 2 \cdot 10^{-6} \langle P \rangle \langle T \rangle^{-2} (77,6 + 0,584 \lambda^{-2})$ – является постоянной величиной при заданных средних значениях давления $\langle P \rangle$, длины волны λ и температуры $\langle T \rangle$.

Цель поставленного эксперимента – исследовать возможность измерения структурной постоянной температуры с помощью акустической метеостанции.

Известна также связь между структурными характеристиками показателя флуктуации диэлектрической проницаемости и показателя преломления

$$C_\epsilon^2 = 4 C_n^2. \quad (2)$$

Таким образом, из (1), (2) структурную характеристику флуктуации температуры можно определять, рассчитав структурную характеристику флуктуации показателя преломления

$$C_T^2 = C_n^2 \left[\frac{10^6 T^2}{79 P} \right]^2, \quad (3)$$

где

$$C_n^2 = \frac{1}{0.344} K^{-7/6} L^{-11/6} \sigma_{IR}^2. \quad (4)$$

Измерив относительную дисперсию флуктуации интенсивности сферической волны $\sigma_{IR}^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1$ и подставив значения волнового числа K , длину измерительной трассы L в (4), атмосферного давления P и температуры T в (3), можно с достаточной точностью определить величину C_T^2 .

Она может быть определена также с помощью прямых измерений пульсаций температуры, поскольку структурная постоянная случайного поля температур

$$C_T^2 = D_T(r) r^{-2/3}, \quad (5)$$

где $D_T(r)$ – структурная функция случайного поля температуры

$$D_T(r) = \langle [T(r_1 + r) - T(r_1)]^2 \rangle. \quad (6)$$

Используя гипотезу замороженной турбулентности, выражение (6) можно записать в виде

$$D_T(\mathbf{v}\tau) = \langle [T(r_1 + \mathbf{v}\tau) - T(r_1)]^2 \rangle, \quad (7)$$

где \mathbf{v}_τ – пространственный вектор скорости ветра.

Таким образом, измеряя температуру в ограниченном объеме через единичные промежутки времени τ , мы можем определить значение $D_T(r)$ и, подставив его в (5), получить в конечном итоге значение структурной постоянной флуктуации температуры C_T^2 .

Автором было разработано и изготовлено несколько типов акустических анеморумботермометров и метеостанций [2], [3]. Структурная схема последнего варианта акустической метеостанции приведена на рис. 1.

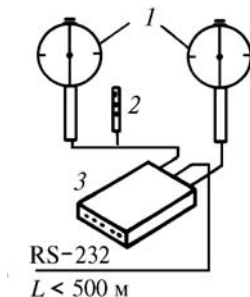


Рис. 1. Структурная схема трехкомпонентной двухуровневой акустической метеостанции: 1 – акустический трехкомпонентный датчик; 2 – датчик влажности; 3 – резидентный компьютер и датчик давления

В полевых условиях в сентябре 1992 г. был поставлен эксперимент по сравнению результатов измерений структурной характеристики температурного поля воздуха оптическим способом и с помощью прямых измерений пульсаций температуры. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

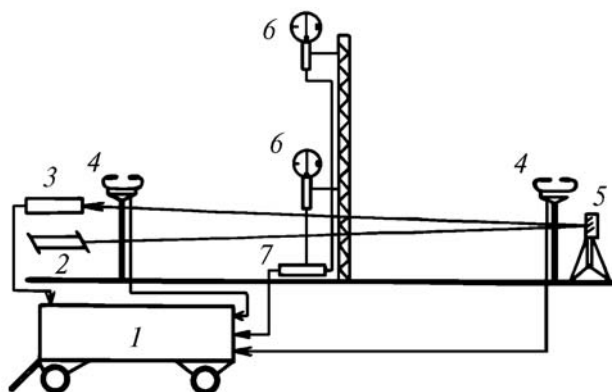


Рис. 2. Схема проведения эксперимента: 1 – передвижной многопроцессорный регистрирующий комплекс; 2 – гелий-неоновый лазер; 3 – фотоэлектронный умножитель с предварительным усилителем; 4 – акустический анеморумботермометр; 5 – плоское зеркало; 6, 7 – интеллектуальная акустическая метеостанция

В оптическом измерителе в качестве излучателя сферической волны использовался гелий-неоновый лазер ЛГ-52 с длиной волны 0,6328 мкм. В качестве отражателя – плоское зеркало диаметром 100 мм, обеспечивающее полный перехват светового луча. Приемником служил фотоэлектронный умножитель ФЭУ-79 с интерференционным фильтром и диафрагмой диаметром 0,2 мм на входе.

Для прямых измерений пульсаций температуры использовались четыре акустических метеодатчика, расположенных в разных участках оптической измерительной трассы. Причем два метеодатчика, измеряющие температуру воздуха в объеме, были расположены в центре трассы на уровнях 2 и 6 м и имели частоту регистрации метеопараметров 7 Гц. Два других располагались в конечных точках трассы и имели частоту регистрации 1 Гц и вчетверо худшую точность.

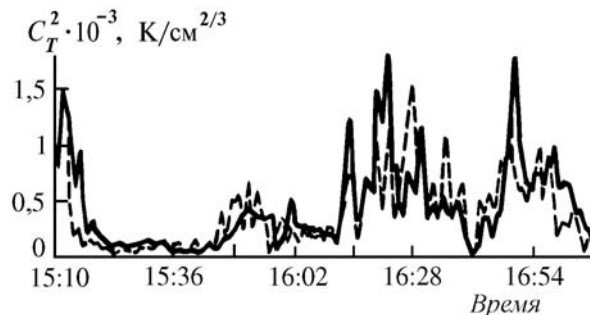


Рис. 3. Структурная характеристика пульсаций температуры при средних и сильных флуктуациях температуры, сплошная линия – данные оптического измерителя, штриховая – акустического

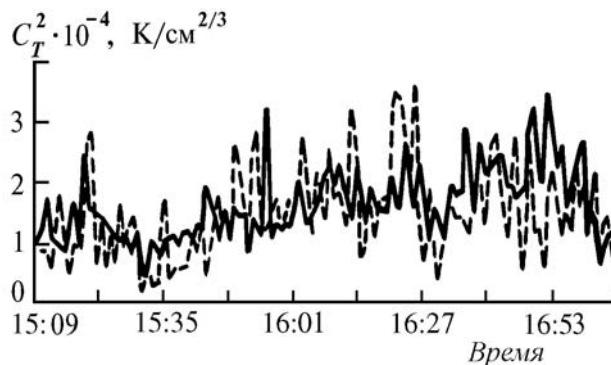


Рис. 4. Структурная характеристика пульсаций температуры при слабых флуктуациях температуры, сплошная линия – данные оптического измерителя, штриховая – акустического

Синхронная регистрация информации производилась на модифицированном многопроцессорном измерительном комплексе [4], в течение 120 мин при различных метеоусловиях.

Из большого количества реализаций было выбрано две, наиболее полно представляющие весь диапазон изменения флуктуации температуры. На рис. 3, 4 представлены результаты вычислений структурной характеристики пульсаций температуры по данным оптических и акустических измерений.

Результаты, представленные на рис. 3, были получены при хорошо развитой кучевой облачности. Минимумы C_T^2 совпадают с временем, когда солнце было закрыто облаком, а с 15:31 до 15:47 шел слабый дождь. Максимумы – когда солнце светило через межоблачные промежутки. Распределение температуры и полного модуля скорости ветра V в это время представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

Эти данные взяты с двух акустических датчиков интеллектуальной метеостанции, расположенной в центре оптической трассы. Один датчик был расположен на высоте 2-х м, а другой на 4 м выше. Мгновенные значения температуры, которые использовались для опре-

деления C_T^2 , брались с нижнего датчика. Разброс значений C_T^2 , полученных из результатов прямых измерений температуры, относительно C_T^2 , полученных из измерения флуктуации интенсивности лазерного луча, объясняется тем, что температура воздуха измерялась локально, а флуктуации интенсивности лазерного луча – на трассе 100 м, то есть имело место пространственное усреднение. Коэффициент взаимной корреляции равен 0,74.

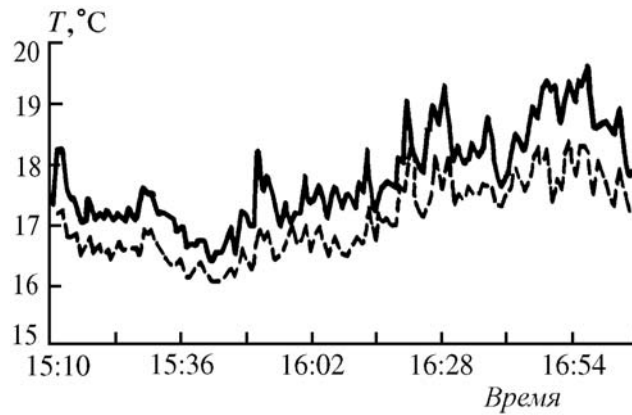


Рис. 5. Локальная температура к реализации, изображенной на рис. 3, сплошная линия на высоте 2-х м, штриховая – на высоте 6-ти м

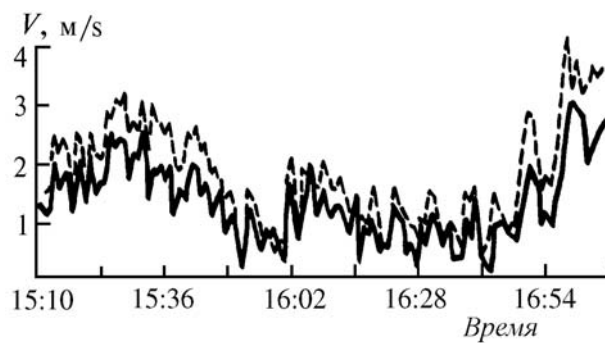


Рис. 6. Полный модуль ветра к реализации, изображенной на рис. 3, сплошная линия на высоте 2-х м, штриховая – на высоте 6-ти м

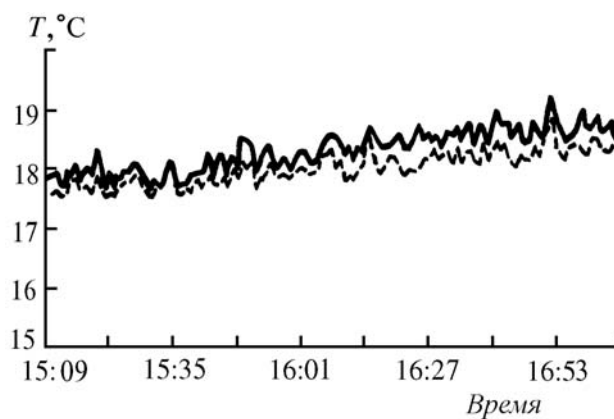


Рис. 7. Локальная температура к реализации, изображенной на рис. 4, сплошная линия – на высоте 2-х м, штриховая – на высоте 6-ти м

На рис. 3 представлены временные распределения C_T^2 в пасмурную почти безветренную погоду, вычисленные из данных тех же датчиков, что и в описанном выше эксперименте. Соответ-

ственно на рис. 7 и 8 представлены временные распределения температуры и полного модуля скорости воздуха во время этой реализации. Как в первом, так и во втором случае просматривается хорошее совпадение значений C_T^2 измеренных принципиально различными методами.

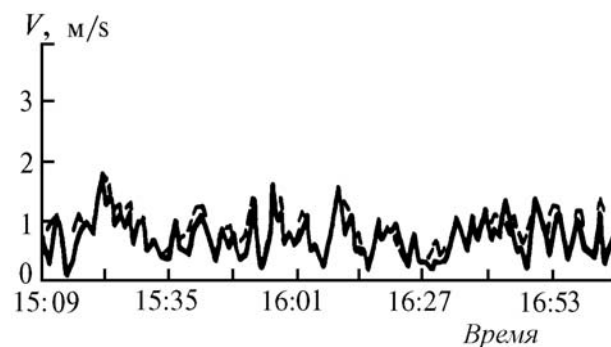


Рис. 8. Полный модуль ветра к реализации, изображенной на рис. 4, сплошная линия – на высоте 2-х м, штриховая — на высоте 6-ти м

Точность измерения температуры, используемой акустической метеостанцией, равна $0,05^{\circ}\text{C}$, а ошибка измерения интенсивности лазерного луча не превышала $0,1\%$. Вычисление дисперсии флуктуации температуры производилось по $N = 100$ отсчетам, частота дискретизации была равна $1,6$ Гц. Поскольку нормированная случайная ошибка вычисления дисперсии [5]

$$\varepsilon(\sigma_T^2) \approx \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (8)$$

то погрешность измерения структурной постоянной флуктуации температуры в этом эксперименте не должна превышать 10% .

В заключение следует отметить, что в большинстве атмосферных ситуаций измерение структурной характеристики температурного поля воздуха акустической метеостанцией обеспечивает достаточную точность для прикладных использований.

1. Татарский В. И. // Распространение волн в турбулентной атмосфере М.: Наука, 1967. 548 с.
2. Анисимов М. В., Монастырный Е. А., Патрушев Г. Я. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 4. С. 196—199.
3. Ростов А. П. // XI Всесоюз. симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах. (Тезисы докл.). Томск: Изд ТНЦ СО АН СССР 1991. С. 196.
4. Ростов А. П. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 125—126.
5. Бендат Дж., Пирсол А. // Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. С. 263.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
15 октября 1992 г.

A. P. Rostov. Experimental investigation of the possibility to measure the structural characteristic of the temperature field of the atmosphere with the acoustic meteostation.

The experimental results on possibility to measure the structural constant of the air temperature with the acoustic meteostation are presented. The possibility to use the precision acoustic meteostation for appreciation of state of the turbulent atmosphere is shown.