

Н.П. Красненко, Л.Г. Шаманаева

УЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ СИГНАЛА ПРИ СОДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ СТРУКТУРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Предложен итерационный метод, позволяющий учесть потери звукового сигнала на дополнительное турбулентное ослабление при интерпретации данных акустического зондирования структурной характеристики флуктуаций температуры. Приведены результаты эксперимента.

В настоящее время моностатические содарты широко используются для измерения структурной характеристики флуктуаций температуры C_T^2 . Однако вопрос о количественных измерениях C_T^2 нельзя считать полностью решенным на стадии методических исследований. Сравнение результатов содартных измерений с данными локальных датчиков показывает, что среднеквадратическое отклонение содартных измерений C_T^2 достигает 40% для диапазона высот 30–500 м, а максимальное – 100% (при учете наземных значений температуры и влажности). Одной из возможных причин отмеченных расхождений является неучет дополнительного турбулентного ослабления звука по трассе распространения до зондируемого объема и обратно.

В данной статье предложен итерационный алгоритм, позволяющий учесть потери звукового сигнала на дополнительное турбулентное ослабление, который используется для интерпретации данных акустического зондирования C_T^2 содартном «ЗВУК-1». Конструкция содара описана в [1], основные характеристики содара приведены ниже:

Высота зондирования, м.	500
Рабочая частота f , Гц.	1650–1850
Электрическая мощность P_0 , Вт.	65
Период посылки импульсов, с.	4; 6
Длительность импульса τ , мс.	150
Эффективная площадь приемной антенны A , м ²	0,5

Структурная постоянная флуктуаций температуры определялась следующим образом. Из уравнения моностатической локации

$$P(z) = P_0 \gamma_1 \gamma_2 \sigma_\pi(z) (c\tau/2)(A/z^2)L(z), \tag{1}$$

где $P(z)$ – мощность принятого с высоты z акустического сигнала; γ_1 и γ_2 – коэффициенты преобразования электрической энергии в акустическую, и наоборот; c – скорость звука в воздухе; $L(z)$ – множитель, учитывающий затухание звука на пути до рассеивающего объема и обратно, находилось $\sigma_\pi(z)$ – сечение обратного рассеяния, и по формуле

$$C_T^2(z) = 1,35 \cdot 10^2 \sigma_\pi(z) T^2 \lambda^{1/3}, \tag{2}$$

где $\lambda = c/f$ – длина звуковой волны; T – приземная температура воздуха, находилось $C_T^2(z)$.

Итерационная процедура строилась следующим образом [2]. Первая итерация $C_T^{2(1)}(z)$ рассчитывалась из уравнения локации (1) без учета турбулентного ослабления на трассе при $L(z) = 1$.

Найденное таким образом значение $C_T^{2(1)}$ использовалось для расчета дополнительного турбулентного ослабления

$$L(z) = \exp \left\{ -2\Delta z \sum_{i=1}^N [\beta_v(z_i) + \beta_T(z_i)] \right\}, \tag{3}$$

где $\Delta z = 8$ м – разрешение содара по высоте, z_i задает текущую высоту слоя; N – общее число слоев толщиной Δz до зондируемого объема; $\beta_v(z)$ – коэффициент ослабления за счет рассея-

ния звука флуктуациями скорости ветра, $\beta_v(z)$ – за счет рассеяния флуктуациями температуры. При условии $L_0^2 \gg \lambda^2$, где L_0 – внешний масштаб турбулентности, коэффициенты рассеяния задаются формулами [3]:

$$\beta_v(z) = 9,542 \frac{C_v^2(z) L_0^5(z)}{C^2 \lambda^2}, \quad (4)$$

$$\beta_T(z) = 0,3596 \frac{C_T^2(z) L_0^5(z)}{T^2 \lambda^2}. \quad (5)$$

При расчете коэффициентов ослабления с использованием формул (4) и (5) в качестве C_T^2 бралась $C_T^{2(1)}$, полученная в первой итерации. Поскольку в нашем эксперименте высотный профиль C_v^2 – структурной характеристики флуктуаций скорости ветра – не измерялся, то он аппроксимировался эмпирическим соотношением

$$C_v^2(z) = C_{v_0}(0,04 + 0,33z^{-2/3}), \quad (6)$$

предложенным в [4] для условий дневной конвекции. Значение структурной характеристики флуктуаций скорости ветра в приземном слое C_{v_0} измерялось микропульсационными датчиками. Использовалась аппаратура, описанная в [5].

При расчете коэффициентов ослабления по формулам (4) и (5) внешний масштаб турбулентности задавался соотношением [6]

$$L_0(z) = \left(\frac{C_T^2(z)}{2,8\gamma_a^2} \right)^{3/4}, \quad (7)$$

где γ_a – адиабатический градиент температуры.

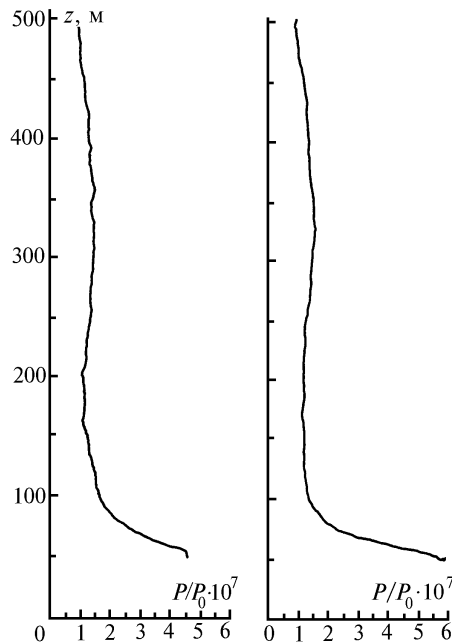


Рис. 1. Вертикальные профили сигналов содара. Время начала измерений 16 ч, интервал усреднения составляет 10 мин. По оси абсцисс отложены значения нормированной мощности принятого сигнала

Подставляя в уравнение локации (1) рассчитанное значение множителя турбулентного ослабления, находим $\sigma_\pi(z)$ и, подставляя его в (2), $C_T^{2(2)}(z)$ – вторую итерацию структурной характеристики флуктуаций температуры. С использованием $C_T^{2(2)}(z)$ рассчитываем множитель турбулентного ослабления и, подставляя его в (1), $\sigma_\pi(z)$. С использованием найденного $\sigma_\pi(z)$ рассчитываем следующую итерацию $C_T^{2(3)}(z)$ и так далее, пока разность между последующим и предыдущим значениями C_T^2 не будет ниже заданного уровня погрешности. Итерационная

процедура прекращается, когда итерации начинают расходиться. Процедура выполняется последовательно для каждого слоя $i = 1, \dots, N$.

Измерения проводились в летнее время. На рис. 1 приведены значения нормированной мощности принятого акустического сигнала для двух последовательных серий зондирования, усредненных за период наблюдения 10 мин. Время начала измерений – 16 ч. На рис. 2 кривыми 1, 2, 3, 4 показаны высотные профили C_T^2 , полученные для четырех последовательных серий зондирования. Они нормированы на значение C_T^2 для высоты зондирования $z_i = 48$ м. Здесь же прямой линией изображена зависимость $C_T^2(z) \sim z^{-4/3}$, характерная для условий дневной конвекции. Из результатов сравнения следует, что полученные высотные профили C_T^2 соответствуют закону $z^{-4/3}$ в интервале высот до $z = 300$ м. Выше 300 м устойчиво наблюдается более быстрое уменьшение C_T^2 в зависимости от высоты.

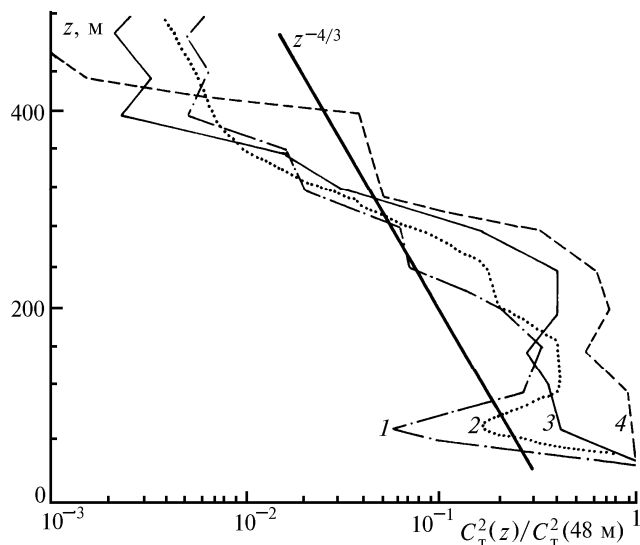


Рис. 2. Профили C_T^2 , восстановленные по данным акустического зондирования с учетом дополнительного турбулентного ослабления

Величину поправки на турбулентное ослабление иллюстрирует таблица, в которой приводятся относительные отклонения

$$\delta C_T^2(z_i) = \frac{C_T^{2(k)}(z_i) - C_T^{2(1)}(z_i)}{C_T^{2(k)}(z_i)} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $C_T^{2(k)}(z_i)$ – конечная итерация C_T^2 .

z_i , м	80	104	144	208	256	304	352	400	480
$\delta C_T^2(z_i)$, %	2,8	5,15	8,97	11,3	14,83	25,18	41,11	84,11	92,4

Видно, что с увеличением высоты зондирования вклад дополнительного турбулентного ослабления растет, достигая 25% для $z_i = 304$ м и 92,4% для $z_i = 480$ м, что свидетельствует о необходимости учета дополнительного ослабления при содарных измерениях C_T^2 .

В заключение авторы выражают благодарность М.Г. Фурсову за участие в проведении измерений и Р.А. Байкаловой за помощь в обработке данных.

1. Гладких В.А., Карпов В.И., Красненко Н.П. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 7. С. 751–756.
2. Байкалова Р.А., Красненко Н.П., Фурсов М.Г., Шаманаева Л.Г. // Тез. докл. XI Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах. Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1991. С. 18.
3. Baikalova R.A., Krekov G.M., Shamanaeva L.G. // JASA. 1988. V. 83. N 3. P. 661–664.
4. Brown E.H., Clifford S.F. // JASA. 1976. V. 60. N 4. P. 788–794.
5. Ростов А.П. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 1. С. 102–106.
6. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.

N. P. Krasnenko, L. G. Shamanaeva. Consideration of a Sound Additional Turbulent Attenuation of Sodar Measurements of Structural Characteristic of Temperature Fluctuation.

An iterative method is proposed allowing for taking into account of a sound additional turbulent attenuation when interpreting the data of acoustic sounding of structural characteristic of the temperature fluctuations. The experimental data are presented.