

В.А. Гладких, С.Л. Одинцов

Калибровка содара «Волна-3»*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 14.05.2001 г.

Обсуждаются методика и результаты калибровки приемно-передающего тракта акустического метеорологического лока-тора (содара). Калибровка предназначена для измерения абсолютных значений структурной характеристики температуры C_T^2 .

Приводятся примеры измерений C_T^2 для устойчивой и неустойчивой стратификации пограничного слоя атмосферы.

Современный набор методов дистанционной акустической диагностики атмосферного пограничного слоя (АПС) должен включать возможность оценок интенсивности случайных пульсаций температурного поля путем измерения его структурной характеристики C_T^2 . Для достижения этой цели необходимо проводить абсолютную калибровку приемно-передающего тракта содара. Процедура полномасштабной калибровки является трудоемкой операцией. Она включает измерения амплитуды излучаемых звуковых сигналов в дальней зоне свободного пространства (или в специальной камере больших размеров со звукопоглощающими стенками), а также измерение напряжений на выходе электронного тракта содара при разных углах прихода плоских звуковых волн с контролируемым давлением.

На практике, однако, используют более простые методики калибровки. Одна из таких методик заключается в привлечении данных независимых измерений C_T^2 на некоторой высоте и их сопоставлении с величинами акустических сигналов, рассеянных на этой высоте и зарегистрированных содаром. В результате определяется коэффициент перехода от квадрата амплитуды u^2 электрического напряжения на выходе электронного тракта содара к величине C_T^2 : $C_T^2 \approx k_c u^2$ (здесь и далее размерность C_T^2 в $\text{K}^2 \cdot \text{м}^{-23}$). В качестве примера реализации такого подхода можно привести работу [1], излагающую подробную методику и результат калибровки – коэффициент $k_c = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{K}^2 \cdot \text{м}^{-23} \cdot \text{В}^{-2}$. Естественно, что этот коэффициент применим только для конкретного содара. Аналогичный подход к измерению C_T^2 был использован и в ряде других работ (см., например, [2–4]).

При калибровке содара «Волна-3», разработанного и изготовленного в ИОА СО РАН, мы применили упрощенную инструментальную методику. Она основана на определении эффективности преобразования электрических сигналов в акустические, т.е. на оценке кпд приемно-излучающего тракта. Подобный подход к калибровке содаров при измерении C_T^2 применялся, например, в работах [5–7]. Технология измерения C_T^2 в этом случае основывается на широко известном уравнении моностатической акустической локации, устанавливающим связь средней мощности регистрируемого содаром сигнала P_a (рассеянного на высоте H температурными пульсациями с эффективным сечением обратного рассеяния σ) с мощностью P_0 излучаемого сигнала,

имеющего длительность τ , несущую частоту f и распространяющегося в атмосфере со скоростью c :

$$P_a = 0,5 c \tau P_0 S L \sigma H^{-2}. \quad (1)$$

Прием сигнала ведется антенной с эффективной площадью S . Поглощение звука по трассе зондирования учитывается путем введения функции ослабления L .

Если использовать представления $\sigma = 0,00753 c^{-1/3} f^{1/3} C_T^2 T^{-2}$ [8] и $c \approx 20,05 \sqrt{T}$ [9], то уравнение локации можно записать в виде

$$P_a = \kappa_s P_0 S \tau L f^{1/3} H^{-2} T^{-5/3} C_T^2. \quad (2)$$

Здесь P_a – мощность, Вт; $\kappa_s = 0,0278$ – размерный коэффициент.

При формулировке уравнения (2) предполагается, что излучение и прием звуковых сигналов производятся одной и той же антенной. Диаграмма направленности (ДН) антенны имеет вид круглого конуса с телесным углом Ω . Распределение интенсивности звуковой волны по сечению конуса полагается постоянным. Угол Ω оценивается по уровню половинной мощности основного лепестка истинной ДН. Помимо этого приближения, в процессе вывода уравнения (2) применяется и ряд других допущений (прямоугольная форма зондирующего импульса, малость рассеянного сигнала по сравнению с излученным, отсутствие рефракции и т. д.).

В связи с подобной формулировкой уравнения (2) нет необходимости в подробном исследовании ДН антенн и проведении полномасштабной калибровки содара для восстановления C_T^2 . Можно ограничиться минимальными сведениями об основных параметрах антенны и приемно-передающего тракта.

Если представить ДН антенны как функцию [10]:

$$R(\psi, \alpha) = p(\psi, \alpha) / p_m, \quad (3)$$

где $p(\psi, \alpha)$ – распределение поля акустического давления в дальней зоне на расстоянии r_0 в зависимости от угловых координат ψ, α (здесь и далее размерность звукового давления в паскалях), p_m – звуковое давление на оси ДН на расстоянии r_0 , то мощность излучаемого сигнала P_0 (в ваттах) можно оценить по формуле

$$P_0 = I_m \iint R^2(\psi, \alpha) ds = r_0^2 I_m \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^\pi R^2(\psi, \alpha) \sin\psi d\psi, \quad (4)$$

а в случае осевой симметрии, которой обладают, в частности, антенны содара «Волна-3»:

$$P_0 = 2\pi r_0^2 I_m \int_0^\pi R_\psi^2 \sin\psi d\psi. \quad (5)$$

Здесь $I_m = p_m^2 / 2\rho c$ – интенсивность звука на оси ДН на расстоянии r_0 от антенны, Вт/м², ρ – плотность воздуха, кг/м³, c – скорость звука, м/с.

В соответствии с аппроксимацией ДН, применяемой при формулировке уравнения (2), имеем

$$R_\psi = \begin{cases} 1, & \psi \leq \Omega / 2, \\ 0 & \psi > \Omega / 2, \end{cases} \quad (6)$$

что при условии малости угла Ω приводит соотношение (5) к виду

$$P_0 \approx \pi r_0^2 \Omega^2 p_m^2 / 2\rho c. \quad (7)$$

Таким образом, одной из составляющих абсолютной калибровки содара по упрощенной методике является определение величин Ω и p_m . Это обеспечивает оценку излучаемой мощности P_0 .

Помимо калибровки содара на излучение, необходимо установить связь между амплитудой давления p_i приходящего на антенну рассеянного звукового сигнала и амплитудой u_e сигнала на выходе полосового усилителя приемной части, т. е. определить коэффициент γ (В/Па) в соотношении

$$u_e = \gamma p_i. \quad (8)$$

Фактически, коэффициент γ является произведением коэффициента преобразования приемопередающих элементов γ_a и коэффициента усиления электронного тракта системы γ_e : $\gamma = \gamma_a \gamma_e$. Коэффициент γ_e безразмерен.

Для удобства автоматизированной обработки измерений в калибровочный процесс необходимо включить и коэффициент преобразования электрического напряжения u_e в цифровое представление на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП):

$$u_d = \gamma_d u_e = \gamma_d \gamma_a \gamma_e p_i, \quad (9)$$

где u_d – напряжение, ед. АЦП; γ_d – коэффициент перехода к цифровому виду сигнала, ед. АЦП/В.

В процессе калибровки содара «Волна-3», работающего с 12-разрядным АЦП, мы объединили калибровку электронного и цифрового трактов, т.е. получили оценку величины $\gamma_d \gamma_e \approx 113,4 \cdot 10^6$ ед. АЦП/В.

Для определения коэффициента γ_a антенна облучалась звуковой волной от внешнего удаленного источника. При этом регистрировались звуковое давление p_i в плоскости раскрытия антенны и амплитуда напряжения u_n на выходе предварительного усилителя, имеющего коэффициент усиления k_n . В итоге был получен коэффициент $\gamma_a = u_n / (k_n p_i) \approx 0,146$ В/Па. Отсюда следует, что звуковое давление p_i на входе «акустического тракта» приемной

системы и его цифровое представление связаны для содара «Волна-3» соотношением

$$u_d = 16,556 \cdot 10^6 p_i. \quad (10)$$

При калибровке содара на излучение измерительный микрофон размещался на удалении r_0 от антенны в плоскости ее возможного вращения. Содар излучал короткие звуковые импульсы с заполнением на частоте 1700,68 Гц. При разных углах наклона антенны измерялось звуковое давление. На рис. 1 приведена часть ДН, необходимая для калибровки содара. Установлено, что ширина ДН по половинной мощности составляет величину $\Omega \approx 8^\circ$. При этом амплитуда звукового давления p_m на расстоянии $r_0 \approx 11,1$ м равна примерно 21,2 Па. Подставляя эти значения в формулу (7), получаем оценку излучаемой в телесный угол Ω мощности $P_0 \approx 3,85$ Вт.

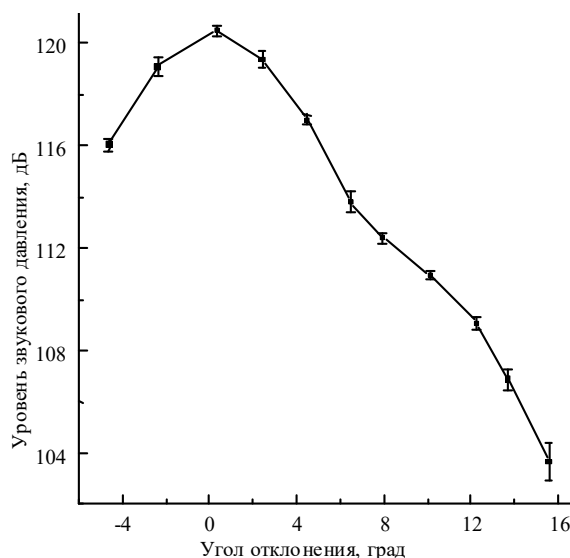


Рис. 1. Уровень звукового давления как функция угла отклонения оси ДН антенны содара «Волна-3» от направления на измерительный микрофон. Вертикальными отрезками показаны стандартные ошибки

В итоге уравнение (2) можно преобразовать к виду

$$u_d^2 = 1,444 \cdot 10^{15} \tau L f^{1/3} H^{-2} T^{-7/6} C_T^2 \quad (11)$$

при условии $\rho = 1,293$ кг/м³.

Таким образом, проведенная инструментальная калибровка содара «Волна-3» позволяет оценить абсолютные величины структурной характеристики пульсаций температуры C_T^2 по формуле

$$C_T^2 = 6,925 \cdot 10^{-16} u_d^2 H^2 T^{7/6} (\tau L f^{1/3})^{-1}. \quad (12)$$

В этой формуле считаются изначально известными длительность зондирующего импульса τ и несущая частота f . Величина u_d^2 измеряется непосредственно в эксперименте. Функция поглощения звука L зависит от температуры, влажности, давления воздуха и дальности до рассеивающего объема. Она может быть вычислена, например, с использованием формул [9]. Дальность H до рассеивающего объема определяется по формуле

$$H = 0,5 (t - t_0)c \approx 10,025 T^{1/2}(t - t_0),$$

где t – момент регистрации амплитуды u_d ; t_0 – начальный момент излучения звукового импульса. Более подробно методика обработки сигналов содара и алгоритм восстановления C_T^2 , а также оценки ошибок изложены в [11].

Отметим, что погрешности восстановления C_T^2 , связанные с проблемой корректного учета метеопараметров, входящих в функцию ослабления L , могут составлять от единиц до сотен процентов в зависимости от текущих метеоусловий. Наиболее благоприятные ситуации реализуются при отрицательных температурах, когда даже значительные ошибки по температуре и влажности воздуха приводят к ошибкам в оценках C_T^2 не более 20–30%.

В качестве примера приведем рис. 2, где показан результат обработки одного из экспериментов. Верхний рисунок представляет исходную запись амплитуды сигнала u_d , а нижний – демонстрирует высотно-временное распределение C_T^2 в форме сглаженной контурной карты, полученное с использованием уравнения (12). Шкала значений C_T^2 приведена под рисунком. Рассмотрен случай распада ночной (радиационной) инверсии температуры и переход к конвективному режиму АПС в летнее время (5 июля 2000 г., Томск). Температура приземного слоя воздуха увеличивалась от 22 °С в 9 ч до 30 °С в 14 ч. Относительная влажность уменьшалась за этот период от 70 до 40%. Очевидно, что C_T^2 имеет типичные значения для рассмотренного случая дневной конвекции.

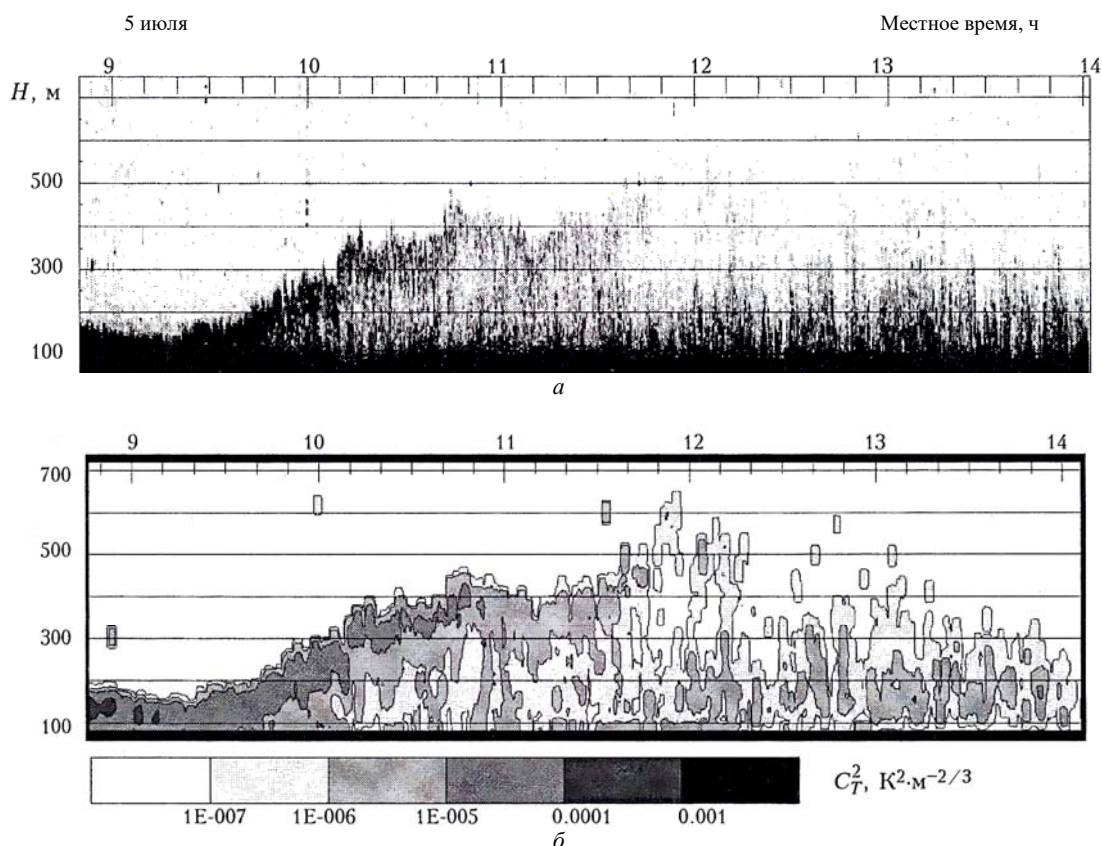


Рис. 2. Пример преобразования высотно-временной развертки амплитуды давления акустического сигнала (а) в контурную карту сглаженных абсолютных значений структурной характеристики температуры C_T^2 (б). Случай распада ночной (радиационной) инверсии температуры и переход к конвективному режиму АПС

Еще один пример восстановления C_T^2 , но для условий зимней (4–5 января 2000 г., Томск) инверсии температуры с проявлением многослойной турбулентности пограничного слоя атмосферы, приведен на рис. 3. Температура и относительная влажность приземного слоя воздуха за рассмотренный период практически не менялись и составляли $(-34,6 \pm 0,8)$ °С и $(77 \pm 1)\%$ соответственно.

Поскольку основная цель статьи заключается в изложении примененной нами методики упрощенной инструментальной калибровки содара, то мы ограничились лишь небольшим количеством иллюстративного материала. Детальный анализ полей C_T^2 в различных термодинамических ситуациях должен составлять предмет специальных исследований.

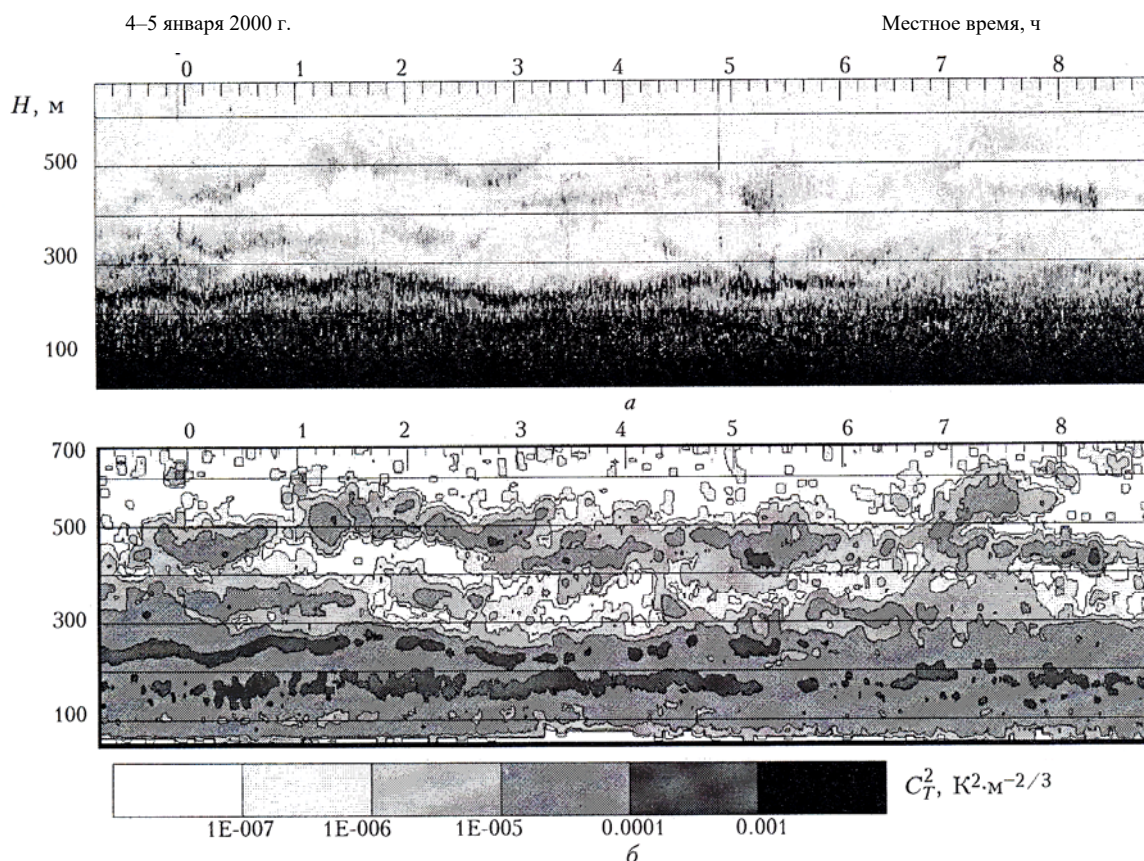


Рис. 3. Пример преобразования высотно-временной развертки амплитуды давления акустического сигнала (а) в контурную карту сглаженных абсолютных значений структурной характеристики температуры C_T^2 (б). Случай устойчивой стратификации в зимнее время

Измерение C_T^2 на основе подобной калибровки содара конечно же требует проверки с помощью данных, полученных независимыми измерительными средствами. Например, высокочувствительными контактными датчиками температуры, размещенными на метеорологической башне (вышке) или на привязном аэростате. Однако в настоящее время у нас такой возможности нет.

1. *Helmis C.G., Kalogiros J.A., Asimakopoulos D.N., Soilemes A.T.* Estimation of potential-temperature gradient in turbulent stable layers using acoustic sounder measurements // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2000. V. 126. P. 31–61.
2. *Asimakopoulos D.N., Cole R.S., Caughey S.J., Crease B.A.* A Quantitative Comparison between Acoustic Sounder Returns and the Direct Measurements of Atmospheric Temperature Fluctuations // *Boundary-Layer Meteorol.* 1976. V. 10. P. 137–148.
3. *Hall F.F., Edinger J.G., Neff W.D.* Convective Plumes in the Planetary Boundary Layer, Investigated with Acoustic Echo Sounder // *J. Appl. Meteorol.* 1975. V. 14. P. 513–523.
4. *Бесчастнов С.П., Русаков Ю.С.* О высотном ходе C_T^2 в устойчиво стратифицированном пограничном слое атмосферы // *Труды Ин-та экспериментальной метеорологии.* 1990. Вып. 51(142). С. 34–38.
5. *Ming-yu Zhou, Nai-ping Lu, Yan-juan Chen.* The detection of temperature structure coefficient of the atmospheric boundary layer by acoustic radar // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1980. V. 61. N 1. P. 303–308.
6. *Singal S. P., Gera B. S., Agarwal S. K.* Determination of structure parameters using sodar // *Boundary-Layer Meteorol.* 1982. V. 23. P. 105–114.
7. *Гурьянов А.Э., Зубковский С.Л., Каллистратова М.А., Карюкин Г.А., Кухарец В.П., Петенко И.В.* О надежности определения вертикального профиля структурной характеристики температуры в атмосфере методом акустического зондирования // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1981. Т. 17. № 2. С. 146–152.
8. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
9. *Bass H.E., Sutherland L.C., Piercy J., Evans L.* Absorption of Sound by the Atmosphere // *Physical Acoustics. Principles and Methods.* 1984. V. 17. P. 145–232.
10. *Тюлин В.Н.* Введение в теорию излучения и рассеяния звука. М.: Наука, 1976. 255 с.
11. *Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Some methodological aspects of sodar measurements of structural characteristics of temperature pulsations // *Proc. 10th Int. Symp. of Acoustic Remote Sensing.* Auckland, New Zealand, 27 November – 1 December, 2000. P. 312–315.

V.A. Gladkikh, S.L. Odintsov. Calibration of sodar «Volna-3».

The paper discusses the method and results of calibration of receiving-transmitting system of acoustic meteorological radar (sodar). The calibration is intended for measurement of absolute values of structural characteristic of the temperature C_T^2 . Examples of C_T^2 measurements for stable and unstable stratification of the atmospheric boundary layer are presented.