

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОВЕЛИЧИН ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ И РАДИОАКУСТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ

Методы акустического и радиоакустического зондирования атмосферы, позволяющие определять профили основных метеовеличин в нижней тропосфере, получают в настоящее время широкое распространение. Акустическое зондирование наиболее часто применяется для измерения скорости ветра, определяемой по доплеровскому сдвигу частоты сигнала, рассеянного на движущихся под действием ветра неоднородностях атмосферы [1]. Радиоакустическое зондирование используется для измерения температуры атмосферы [2]. Этим методам посвящено большое количество публикаций, в которых рассматриваются различные теоретические и практические вопросы, но, тем не менее, в результатах определения метеовеличин этими методами содержатся значительные методические погрешности.

Радиальную (по лучу диаграммы направленности) составляющую скорости ветра для моностатического акустического локатора в настоящее время принято определять по следующей формуле

$$V = \frac{C_a}{2f_a} f_{\Delta a}, \quad (1)$$

где $f_{\Delta a}$ – доплеровский сдвиг частоты; f_a – частота зондирующего сигнала; C_a – скорость звука.

Под скоростью звука C_a здесь понимают скорость звука в неподвижной атмосфере, т.е. $C_a = A\sqrt{T}$, где A – коэффициент, слабо зависящий от состава воздуха и его влажности; T – абсолютная температура атмосферы. Однако в действительности при наличии ветра скорость звука $C_a = A\sqrt{T} + V$, где V – радиальная скорость ветра.

Выражение (1) с учетом движения среды записывается в виде

$$V = \frac{(A\sqrt{T} + V)}{2f_a} f_{\Delta a}. \quad (2)$$

В выражение (2) искомая радиальная скорость ветра входит и в левую и в правую части. Формула (1) следует из (2) при отбрасывании V в правой части. Однако это недопустимо, так как приводит к появлению методической погрешности δV , равной $Vf_{\Delta a} / 2f_a$. Расчет этой погрешности следует производить по формуле

$$\delta V = \frac{V^2}{A\sqrt{T} + V}. \quad (3)$$

Так, при $A\sqrt{T} = 340$ м/с, $V = 20$ м/с, $\delta V = 1,11$ м/с.

Величина ошибки, вносимой неопределенностью величин A и T в точке рассеяния, при вычислении скорости радиального ветра по формуле (1) определяется выражением

$$\delta V = \frac{\Delta A \sqrt{TV}}{A\sqrt{T} + V} + \frac{\Delta T V A^2}{2(A\sqrt{T} + V)^2}, \quad (4)$$

где первый член вызван неопределенностью A , второй – неопределенностью T .

Погрешность, вызванную отбрасыванием члена $Vf_{\Delta a} / 2f_a$, можно исключить, если выражение для вычисления радиальной скорости ветра получить, решая (2) относительно V :

$$V = \frac{A\sqrt{T}f_{\partial a}}{2f_a - f_{\partial a}}. \quad (5)$$

В выражении (5) остаются только погрешности, обусловленные неопределенностью A и T . Значение суммарной погрешности рассчитывается по формуле

$$\delta V = \frac{\Delta A V}{A} + \frac{\Delta T V}{2T}. \quad (6)$$

Использование приближенной формулы (1) при определении трех компонент скорости ветра также приводит к появлению ошибок. Рассмотрим, например, трехканальный метод измерения скорости ветра, описанный в [1]. Антенна одного из каналов ориентируется точно в зенит (ось Z), две другие под определенным углом α к зениту: одна в северном направлении (направление X), другая в восточном направлении (направление Y). Тогда составляющие скорости ветра в каждом из каналов определяют по формулам (1):

$$V_z = \frac{C_a}{2f_a} f_{\partial az}; \quad V_1 = \frac{C_a}{2f_a} f_{\partial a1}; \quad V_2 = \frac{C_a}{2f_a} f_{\partial a2}, \quad (7)$$

а составляющие горизонтального ветра

$$V_x = \frac{1}{\sin \alpha} (V_1 - V_z \cos \alpha); \quad V_y = \frac{1}{\sin \alpha} (V_2 - V_z \cos \alpha).$$

Погрешности определения составляющих горизонтального ветра вычисляются по формулам:

$$\delta V_x = \frac{1}{\sin \alpha} (\delta V_1 + \delta V_z \cos \alpha); \quad \delta V_y = \frac{1}{\sin \alpha} (\delta V_2 + \delta V_z \cos \alpha).$$

Здесь $\delta V_1, \delta V_2, \delta V_z$ рассчитываются по формуле (3). Если предположить, что направление ветра совпадает с положительным направлением X , а величина его в первом канале $V_1 = 20$ м/с, то при $\alpha = 30^\circ$ имеем ошибку определения составляющей горизонтального ветра $\delta V_x = 2,22$ м/с.

Для исключения указанной методической погрешности из результатов измерений выражения (7) следует записывать в виде:

$$V_z = \frac{A\sqrt{T}f_{\partial az}}{2f_a - f_{\partial az}}; \quad V_1 = \frac{A\sqrt{T}f_{\partial a1}}{2f_a - f_{\partial a1}}; \quad V_2 = \frac{A\sqrt{T}f_{\partial a2}}{2f_a - f_{\partial a2}}.$$

В комбинированной системе расдар-содар вычисление радиальной составляющей скорости ветра по формуле (1) является также причиной погрешности при определении температуры. Следует заметить, что выражения для обработки результатов измерений содара и расдара представляют собой систему двух уравнений относительно неизвестных V и T с параметром A

$$\begin{cases} f_{\partial a} = \frac{2Vf_a}{A\sqrt{T} + V}; & f_{\partial e} = \frac{2(A\sqrt{T} + V)f_e}{C_e}, \end{cases} \quad (8)$$

где $f_{\partial e}$ – доплеровское смещение частоты радиосигнала, f_e – частота зондирующего радиосигнала, C_e – скорость распространения радиоволн. Однако в рассматриваемой литературе радиальный ветер определяют из первого уравнения (8) по формуле (1). При этом общая методическая ошибка нахождения V определяется отбрасыванием члена $Vf_{\partial a} / 2f_a$, неопределенностью в точке измерения температуры T и коэффициента A . Затем, используя полученное значение V , находят значение T из второго уравнения (8). При этом также дополнительно присутствует ошибка из-за изменчивости A с высотой. Так, например, при $V = 10$ м/с и неопределенности $\Delta T = 2^\circ K$, $\Delta A = 0,02 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} K^{-1/2}$ общая ошибка оп-

ределения скорости радиального ветра по формуле (1) составляет $\delta V = 0,33$ м/с, а ошибка определения температуры $\delta T = 0,56^\circ \text{K}$.

Суммарная ошибка определения температуры вычисляется по формуле

$$\delta T = \frac{2\sqrt{T}\delta V}{A} + \frac{2\Delta AT}{A}, \quad (9)$$

где δV – общая методическая погрешность определения скорости ветра.

Все указанные ошибки при нахождении V можно исключить, если выразить $(A\sqrt{T} + V)$ из второго и подставить в первое уравнение (8). Тогда

$$V = \frac{f_{da} f_{de} C_e}{4f_a f_e}. \quad (10)$$

Выражение для вычисления T , с учетом свободной от методических погрешностей величины V , полученное из второго уравнения (8), имеет вид

$$T = \left(\frac{f_{de} C_e}{2f_e} - V \right)^2 \frac{1}{A^2}. \quad (11)$$

В выражении (11) единственным источником методической погрешности является неопределенность величины A вдоль трассы зондирования, а это значит, что первый член в формуле (9) обращается в нуль.

Таким образом, для уменьшения погрешности определения радиальной скорости ветра при акустическом зондировании вычисления следует производить по формуле (5). В комбинированной системе расдар-содар вычисления скорости ветра и температуры – соответственно по формулам (10) и (11). Применение полученных выражений особенно эффективно при определении наклонных профилей температуры комбинированной системой расдар-содар.

Список литературы: 1. Красненко Н. П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986, 168 с. 2. Каллистратова М. А., Кон А. И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985, 200с.

Харьковский государственный технический
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 19.11.99