

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 551.508.8

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.А. ТИХОНОВ, д-р физ.-мат. наук,
В.В. ВОРОНИН*

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

В последнее время значительное внимание уделяется развитию и совершенствованию теории и техники дистанционного зондирования атмосферы с использованием акустических и электромагнитных волн – системам акустического (САЗ), радиоакустического (РАЗ), радиолокационного и лазерного зондирования [1 – 5].

Каждый из известных методов дистанционного измерения параметров атмосферы имеет свои достоинства и недостатки, ограничения и характеризуется некоторой областью потенциальных возможностей, которая определяется множеством измеряемых параметров с соответствующими точностными характеристиками, пространственно-временным разрешением этих измерений, диапазоном перекрываемых высот, диапазоном значений измеряемых параметров и условий, в которых сохраняется работоспособность того или иного метода.

Поскольку области возможностей различных методов не совпадают, то появляется предпосылка совместного, комплексного использования систем различного вида для расширения набора измеряемых метеорологических величин, расширения диапазона исследуемых высот и повышения информативности получаемых данных зондирования путем совместной (комплексной) их обработки и интерпретации.

Комплексные системы дистанционного зондирования

В настоящее время наряду с комплексами, состоящими из двух или трех различных систем дистанционного зондирования, находят применение развернутые комплексные системы для решения задач исследования процессов в атмосфере, включающие в себя наряду со средствами дистанционного зондирования, основанными на различных принципах, работающими в различных частотных диапазонах и по различным методикам, различную контактную метеоаппаратуру, расположенную, в том числе, на носителях, способных поднимать ее над поверхностью Земли. Из используемых средств дистанционного зондирования при этом чаще всего применяются содары, мини-содары, станции радиоакустического зондирования, ветровые профилеры, лидары, спектрометры и радиометры [6 – 8].

Наиболее известная из комплексных систем, предназначенных для исследования атмосферы, – “Линденбергская колонна” [9 – 10]. Название этой системы стало нарицательным. Создана система в Германии и включает в себя следующие средства для выполнения дистанционных измерений: ветровой профилер (систему вертикального радиолокационного зондирования) с системой РАЗ LAP-3000 производства компании “Радиян”; моностатический трехканальный доплеровский содар ECHO-1, имеющий три антенны; мини-содар AV-4000 с ФАР фирмы “AeroVironment”, станцию радиозондирования Vaisala RS-80, а также измерительную систему контактного типа A. I. R. TMT-4a на привязном баллоне-аэростате.

Комплексная измерительная система “Линденбергская колонна” обеспечивает возможность получать профили температуры и скорости ветра в диапазоне высот 10 – 5500 м с пространственным разрешением от 5 до 200 м, параметры турбулентности атмосферы и другую метеорологическую информацию, позволяющую оценивать, в частности, высоту области перемешивания и высоту пограничного слоя. Достаточно длительная (на протяжении

нескольких лет) эксплуатация этой измерительной системы на практике подтвердила имеющиеся богатые информационные возможности по комплексному оцениванию состояния атмосферы и эффективность ее использования при решении многих научных и прикладных задач.

Известны подобные комплексные системы, состоящие из разнообразных средств измерений, которые используются в США (система NOAA), в Австралии, Новой Зеландии. В Новой Зеландии, например, система, содержащая расдар, содар, мини-содар, ультразвуковой спектрометр и дождевой измеритель-плювиограф, применялась для определения влияния орографии и возвышенностей местности на распределения ветра и осадков на заданной территории [11].

Как показывают имеющиеся в литературе данные, комплексные измерительные метеорологические системы создаются, как правило, из имеющейся в наличии аппаратуры с определенными заранее фиксированными характеристиками. Вследствие этого необходимого дополнения составных частей комплексного измерительного средства на практике не достигается. Недостаточно развиты при этом и алгоритмы комплексной, совместной обработки информации, получаемой в таких структурах.

Комплексный алгоритм обработки информации в системе совмещенного акустического-радиоакустического зондирования

Основной подход к комплексированию акустических и радиоакустических систем зондирования атмосферы направлен на повышение точности оценивания температуры путем совместной обработки получаемых с их помощью данных, которые определяют функционально связанные между собой скорость ветра и скорость звука. Этот подход имеет место также при комплексировании систем вида “профилер-РАЗ”. При этом система РАЗ осуществляет измерение скорости звука, а профилер – измерение скорости ветра, что позволяет в результате совместной обработки получаемых данных находить более точные значения температуры зондируемой среды. Такие виды комплексирования в силу естественного аппаратного и информационного дополнения систем одного вида другим на практике могут обеспечить значительный эффект [6, 9].

Радиальную (по лучу диаграммы направленности) составляющую скорости ветра при использовании моностатического акустического локатора принято определять из соотношения [2]

$$V = \frac{c_s}{2f_s} f_d, \quad (1)$$

где f_d – доплеровский сдвиг частоты; f_s – частота зондирующего сигнала.

В (1) скорость звука c_s – это скорость распространения акустической волны в неподвижной атмосфере, которая определяется следующим образом: $c_s = a_K \sqrt{T_0}$, где a_K – коэффициент, слабо зависящий от состава воздуха и его влажности. В действительности же в реальной среде имеет место перенос воздушных масс, поэтому с учетом скорости ветра скорость звука изменяется: $c_s = a_K \sqrt{T_0} + V$, где V – радиальная скорость ветра.

Тогда, с учетом движения среды, операционное выражение (1) будет выглядеть иначе:

$$V = \frac{(a_K \sqrt{T_0} + V)}{2f_s} f_d. \quad (2)$$

Как видно, в выражении (2) искомая лучевая, радиальная скорость ветра входит как в левую, так и в правую части. Соотношение (1) вытекает из (2), если пренебречь значением V в правой части. Пренебрежение значением V в правой части (2) приводит к появлению

методической погрешности δV , равной $Vf_d/2f_s$. Значение этой погрешности может быть оценено по формуле

$$\delta V = \frac{V^2}{a_K \sqrt{T_0} + V}. \quad (3)$$

Так, при $a_K \sqrt{T_0} = 340 \text{ м/с}$, $V = 20 \text{ м/с}$ имеем $\delta V = 1,11 \text{ м/с}$.

Значение ошибки, вносимой неопределенностями в точке рассеяния атмосферы величин a_K и T_0 , при вычислении скорости радиального ветра по формуле (1) определяется соотношением

$$\delta V = \frac{\Delta a_K \sqrt{T_0} V}{a_K \sqrt{T_0} + V} + \frac{\Delta T_0 V a_K^2}{2(a_K \sqrt{T_0} + V)^2}, \quad (4)$$

где первый член выражения порожден неопределенностью параметра a_K , второй – обусловлен неопределенностью температуры T_0 .

Погрешность, появляющаяся вследствие пренебрежения членом $Vf_d/2f_s$, может быть устранена полностью, если операционное выражение для вычисления радиальной скорости ветра получить, решая (2) относительно скорости ветра V . Тогда

$$V = \frac{a_K \sqrt{T} f_d}{2f_s - f_d}. \quad (5)$$

Источниками методической погрешности в выражении (5) являются неопределенности в точке рассеяния величин a_K и T_0 . Значение суммарной методической погрешности, порожденной этими факторами, определяется соотношением

$$\delta V = \frac{\Delta a_K V}{A} + \frac{\Delta T_0 V}{2T_0}. \quad (6)$$

При определении трех компонент скорости ветра с помощью содара методом трех зондирований использование формулы (1) также приводит к появлению методических ошибок. Например, для трехканального метода измерения скорости ветра, описанного в [2], антенна одного из каналов ориентируется точно в зенит (ось Z), две другие направляются под определенным углом α к зениту: одна в северном направлении (направление X), другая – в восточном (направление Y). При этом радиальные составляющие скорости ветра в каждом из каналов определяют по формулам [11]:

$$V_z = \frac{c_s}{2f_s} f_{dz}, \quad V_1 = \frac{c_s}{2f_s} f_{d1}, \quad V_2 = \frac{c_s}{2f_s} f_{d2}, \quad (7)$$

а составляющие горизонтального ветра получаются в результате пересчета полученных значений

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

Значения погрешностей определения компонентов скорости горизонтального ветра в рассматриваемой схеме зондирования следует вычислять по формулам:

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

Погрешности оценки отдельных лучевых компонент $\delta V_1, \delta V_2, \delta V_z$ определяются выражением (3).

Рассмотрим модельный эксперимент, в котором направление скорости ветра будет совпадать с положительным направлением оси X , а значение его в первом канале измерительной системы составляет $V_1 = 20 \text{ м/с}$. Тогда при угле $\alpha = 30^\circ$ получаем величину ошибки определения составляющей горизонтального ветра $\delta V_x = 2,22 \text{ м/с}$.

С целью устранения указанной методической погрешности из результатов измерений операционные выражения (7) должны быть представлены в таком виде:

$$V_z = \frac{a_K \sqrt{T_0} f_{dz}}{2f_s - f_{dz}}, \quad V_1 = \frac{a_K \sqrt{T_0} f_{d1}}{2f_s - f_{d1}}, \quad V_2 = \frac{a_K \sqrt{T_0} f_{d2}}{2f_s - f_{d2}}.$$

В комбинированной зондирующей системе акустический-радиоакустический локатор вычисление по формуле (1) радиальной составляющей скорости ветра также приводит к формированию дополнительной погрешности при последующем определении температуры среды.

При использовании формулы (1) в комбинированной системе общая методическая ошибка нахождения V определяется отбрасыванием члена $Vf_d / 2f_s$, неопределенностью значений в точке измерения температуры T_0 и коэффициента a_K . Затем, используя полученное значение V , находят значение T_0 из выражения для определения температуры с помощью системы радиоакустического зондирования:

$$f_{de} = \frac{2(a_K \sqrt{T_0} + V)f_e}{c}. \quad (8)$$

При этом в результатах вычислений также дополнительно присутствует ошибка из-за изменчивости коэффициента a_K с высотой. Так, например, при $V = 10 \text{ м/с}$ и неопределенности $\Delta T_0 = 2^\circ \text{ К}$, $\Delta a_K = 0,02 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \text{ К}^{-1/2}$ общая ошибка определения скорости радиального ветра по формуле (1) составляет $\delta V = 0,33 \text{ м/с}$, а ошибка определения температуры $\delta T_0 = 0,56^\circ \text{ К}$.

Суммарная ошибка определения температуры, вызванная влиянием указанных факторов, вычисляется по формуле

$$\delta T = \frac{2\sqrt{T_0}\delta V}{a_K} + \frac{2\Delta a_K T}{a_K}, \quad (9)$$

где δV – общая методическая погрешность определения скорости ветра.

Как можно заметить, выражение (5) для обработки результатов измерений содара и выражение для обработки результатов измерений расдара (8) представляют собой систему двух уравнений относительно неизвестных V и T с параметром a_K

$$\begin{cases} f_d = \frac{2Vf_s}{a_K \sqrt{T_0} + V}, \\ f_{de} = \frac{2(a_K \sqrt{T_0} + V)f_e}{c}, \end{cases} \quad (10)$$

где f_{de} – доплеровское смещение частоты радиосигнала; f_e – частота зондирующего радиосигнала; c – скорость распространения радиоволн.

Все указанные величины ошибок при нахождении скорости ветра V можно исключить, если выразить члены $(a_K \sqrt{T_0} + V)$ из выражения (8) и подставить их в первое уравнение (10).

Тогда получим операционное выражение для нахождения радиальной скорости ветра в комплексной системе

$$V = \frac{f_d f_{de} c}{4 f_s f_e}. \quad (11)$$

Соотношение для вычисления температуры T_0 среды при использовании свободного от методических погрешностей значения скорости ветра V , полученное из второго уравнения (10), имеет вид

$$T_0 = \left(\frac{f_{de} c}{2 f_e} - V \right)^2 \frac{1}{a_K^2}. \quad (12)$$

В выражении (12) единственным источником методической погрешности остается неопределенность параметра a_K вдоль трассы зондирования, который незначительно зависит от влажности среды, а это значит, что первый член в формуле (9) при использовании предложенного алгоритма обработки результатов измерений обращается в нуль.

Выводы

При акустическом зондировании атмосферы с целью уменьшения погрешности определения радиальной скорости ветра следует использовать соотношение (5). В комбинированной системе расдар-содар для вычисления скорости ветра и температуры следует использовать соответственно формулы (11) и (12). Применение полученных операционных выражений особенно эффективно при определении наклонных профилей температуры комбинированной системой расдар-содар.

Список литературы: 1. *Карташов В.М., Тихонов В.А.* и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. – Харьков : ХНУРЭ, 2014. – 312 с. 2. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферы. – Новосибирск : Наука, 1986. – 167 с. 3. *Калистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 200 с. 4. *Захаров В.М., Костко О.К.* Метеорологическая лазерная локация. – М. : Гидрометеиздат, 1977. – 222 с. 5. *Довиак Р., Зрнич Д.* Доплеровские локаторы и метеорологические наблюдения : пер. с англ. – Л. : Гидрометеиздат, 1988. – 503 с. 6. *Бабкин С.И., Делов И.А., Прошкин Е.Г.* Комплекс аппаратуры для совмещенного зондирования пограничного слоя атмосферы электромагнитными и акустическими волнами // Радиотехника. – 1998. – № 106. – С. 23-28. 7. *Peters G., Kirtzel H.J., Fischer B., Schlotfeldt T.* A small RASS -as an extension of a doppler sodar /// Proc. 8th Int. Symp. on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans (ISARS). – Moscow. – 1996. – P. 3.7-3.11. 8. *Wolfe D.E., Lataitis R.J., Weber B.L.* Design and preliminary field test of a combined RF acoustic phased -array antenna for profiler operations // Extended abstracts of COST-76 Profiler Workshop. – Engelberg (Switzerland). – 1997. – P. 151 -154. 9. *Peters G., Hirsch L., Fischer B.* et al. On turbulence measurements with RADAR, RASS, SODAR and DIAL // Extended abstracts of COST-76 Profiler Workshop. – Engelberg (Switzerland). – 1997. – P. 195-197. 10. *Beyrich F., Engelbart D., Gorsdorf U., Neisser J.* Simultaneous Measurements of Vertical Profiling Systems -a Contribution to the “Lindenberg Column” // Proc. 8th Int. Symp. on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans (ISARS). – Moscow. – 1996. – P. 3.73-3.78. 11. *Bradley S.S., Taylor J.* Sodar, mini-sodar, RASS, rain profiler and ultrasonic spectrometer use in a mesoscale // Proc. 9th Int. Symp. on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans (ISARS). – Vienna (Austria). – 1998. – P. 167-170.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 12.08.2016