

Исследование погрешностей определения координат изобарических поверхностей при радиозондировании атмосферы

А.С. Боровков

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Investigation of Errors in Determining Coordinates of Isobaric Surfaces during Radiosounding of Atmosphere

A.S. Borovkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Представлен анализ погрешностей определения координат изобарических поверхностей при аэрологическом радиозондировании атмосферы с использованием отечественных радиолокаторов. Определена область пространства, в которой выполняются рекомендации Всемирной метеорологической организации по погрешностям измерения высоты и давления. Показано, что в нормируемой зоне дальности радиолокаторов существуют большие доли пространства, где результаты измерений координат изобарических поверхностей и профилей температуры не представляют ценности.

Ключевые слова: аэрологический радиолокатор; изобарическая поверхность; профиль температуры.

The analysis of errors in determining the coordinates of isobaric surfaces during radiosounding of atmosphere using Russian radar has been presented. The area of space, where errors in the measurement of height and pressure fit the recommendations of the World Meteorological Organization are fulfilled, has been determined. It has been shown that in the rated range radar zone there is a vast area of the space, where the measurement results of the coordinates of isobaric surfaces and the temperature profiles have a negligible value.

Keywords: aerological radar; isobaric surface; temperature profile.

Введение. Погрешность определения высоты изобарических поверхностей при аэрологическом радиозондировании атмосферы является одной из составляющих погрешностей совместных измерений зависимостей метеовеличин, вносимых в карты барической топографии и аэрограммы. Международные сличения радиозондов выявили [1, с. I. 12–18; 2], что погрешности измерений координат изобарических поверхностей и вертикальных профилей температуры с помощью российской радиолокационной станции (РЛС) в 3–4 раза больше средних значений погрешностей шести участников, применивших более точные средства измерения (СИ). Поэтому актуальны исследования пределов допускаемых погрешностей РЛС как СИ высоты зонда, используемых для расчета давления p и профилей температуры.

Анализ погрешностей. В настоящей работе анализируются нормируемые метрологические характеристики (МХ) РЛС, используемых в аэрологической сети России как СИ высоты зонда h , а также соответствие погрешностей результатов косвенных измерений Δh и Δp рекомендациям Всемирной метеорологической организации (ВМО) [1, с. I. 12–38].

Основные задачи анализа: установить зависимость погрешностей измерений высоты Δh и давления Δp от нормируемых пределов допускаемых значений инструментальных погрешностей РЛС как СИ наклонной дальности l и угла места α ; оценить погрешности h и p с использованием РЛС МАРЛ-А, Вектор-М, применяемых в аэрологической сети России в их диапазонах измерений l и α , и соответствие значений Δh и Δp значениям, рекомендуемым ВМО. При анализе РЛС рассматривается как СИ, для которого следует нормировать МХ в соответствии с ГОСТ 8.009 [3], как это принято для других метеовеличин [4, 5]. Обоснованность признания РЛС как СИ подтверждается, по крайней мере, десятью пунктами документа [6] – 5.2.1.4, 5.2.3.2, 5.3, 5.4.4, 5.4.5, 9.2, 9.2.1, 9.2.6, 9.2.7, 9.2.8, несмотря на имеющиеся расхождения с ГОСТ 8.009 в терминах.

Для анализа приняты следующие исходные положения: приведенные в [6] диапазоны измерений l , α и нормируемые значения инструментальных погрешностей Δl , $\Delta \alpha$ РЛС МАРЛ-А, Вектор-М; систематизация источников погрешностей РЛС как СИ высоты, содержащаяся в [1, с. I. 12–11]; рекомендации ВМО по значениям допускаемых погрешностей Δh и Δp , за пределами которых результаты измерений не представляют ценности (negligible value); приведенные в [6] методы обеспечения правильности измерений α ; ГОСТ 4401 [7] и барометрическая формула для расчетов результатов p и оценки погрешностей Δp косвенных измерений давления.

Рассмотрим модель РЛС как СИ для прямых измерений l и α и косвенных измерений h и p . Показания РЛС: $l = \Delta t c$, где Δt – половина интервала времени передачи сигнала от РЛС до зонда и обратно; c – скорость распространения электромагнитной волны. Шкала интервалов времени формируется в РЛС генератором эталонной частоты f_s , ценой деления является период $T_s = f_s^{-1}$, показателем – число периодов N , так что показания $\Delta t = NT_s$. Методы испытаний и поверки подобных СИ – это стандартные операции радиоизмерений, выполнение которых в заводских условиях не представляет затруднений. Результатом измерения α является угол в вертикальной плоскости между направлениями горизонта и направлением максимума или направлением равносигнальной линии диаграммы направленности антенны при электронном сканировании. Для материализации в РЛС абсолютной аддитивной шкалы измерений α необходимы установление цены деления шкалы и привязка показаний, принимаемых за нуль шкалы, к горизонту.

Для установления цены деления шкалы в составе РЛС имеются СИ разности двух значений плоского угла с нормируемой ценой деления (дискрета). В АВК-М – это измерители угла поворота антенны в вертикальной плоскости, а в МАРЛ-А – это преобразователь кода управляющего сигнала системы сопровождения зонда в показания угла между направлением луча и горизонтом.

Установление нуля шкалы измерителя в РЛС должно обеспечиваться расчетом антенны, ее конструкцией и технологией изготовления. Правильность установки нуля периодически должна проверяться операцией, которая в [6] называется проверкой правильности измерения угловых координат радиозондом. Эта операция должна

проводиться для каждой РЛС по методике, приведенной в [6] (п. 9.2.1–9.2.8), т.е. аналогично тому, как проводится поверка СИ.

В [6] приведены два варианта набора показателей точности для наиболее распространенных РЛС–МАРЛ-А, МАРЛ-АТ. Первый набор нормируемых МХ содержится в руководстве по эксплуатации РЛС: «... СКО случайной составляющей погрешности измерений не превышает по ... углу места $0,1^\circ$ » (п. 5.4.4); «систематическая составляющая погрешности определения координат радиозонда ... не превышает ... по углу места $\pm 0,1^\circ$ ». Другой набор нормируется в [6] для операции «проверки правильности измерений угловых координат сравнительными наблюдениями ... с целью экспериментального определения погрешности измерения этих координат МАРЛ-А» (с помощью теодолита в качестве рабочего эталона). При этом допускаемые значения экспериментального определения случайных составляющих погрешностей измерений вертикального угла МАРЛ-А составляют не более $11'$, допускаемые значения экспериментального определения систематических составляющих погрешностей измерения вертикального угла МАРЛ-А – не более $8'$.

Будем считать МХ, указанные в первом наборе, пределами допускаемых значений систематической погрешности и средним квадратическим отклонением (СКО) случайной погрешности для РЛС как СИ. Для прямых измерений примем доверительную границу суммарной погрешности результата, равной пределу допускаемой погрешности для соответствующей доверительной вероятности. Тогда для первого набора нормируемых значений оценку суммарного СКО результата измерения угла $S_\Sigma(\alpha)$, рассчитанного по ГОСТ 8.207 [8], можно считать $S_\Sigma(\alpha) = 0,12^\circ$ при равномерном распределении систематической погрешности и усеченном нормальном распределении случайной погрешности в пределах допуска. Если за пределы допускаемой систематической погрешности и СКО случайной погрешности РЛС принять значения из второго набора, которые ограничивают минимальные достижимые значения систематической и случайной погрешностей, то расчетное значение $S_\Sigma(\alpha) = 0,2^\circ$. Средняя между двумя значениями оценка $S_\Sigma(\alpha) \approx 0,15^\circ$ близка, по-видимому, к действительному значению погрешности измерения с использованием РЛС.

Высота зонда h относительно положения РЛС определяется как результат косвенных измерений по формуле, учитывающей кривизну Земли и рефракцию электромагнитного излучения:

$$h = \sqrt{l^2 + \left(\frac{4}{3}r_0\right)^2} + \frac{8}{3} \cdot r_0 \cdot l \cdot \sin \alpha - \left(\frac{4}{3}r_0\right), \quad (1)$$

где r_0 – радиус Земли; α – угол, образованный l и проекцией на плоскость, перпендикулярную r_0 в точке расположения антенны. l и α являются результатами прямых измерений с применением РЛС.

Значение СКО суммарной погрешности высоты Δh определяется по формуле для погрешности косвенных измерений:

$$\Delta h = \left[\left(\frac{\partial h}{\partial \alpha} \right)^2 S_\Sigma^2(\alpha) + \left(\frac{\partial h}{\partial l} \right)^2 S_\Sigma^2(l) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $S_{\Sigma}(l)$, $S_{\Sigma}(\alpha)$ – пределы допускаемого значения СКО суммарной погрешности РЛС как СИ l и α .

Значение СКО суммарной погрешности косвенных измерений давления рассчитывается как дифференциал барометрической формулы:

$$\Delta p = -gMp_0\Delta h \exp\left[-\frac{ghM}{RT}\right](RT)^{-1}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения; p – давление газа в слое, расположенном на высоте h (высота над уровнем моря); p_0 – давление на нулевом уровне (на высоте h_0 относительно уровня моря); M – молярная масса газа; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Результаты расчета погрешностей по формулам (2), (3) представлены в форме диаграмм зависимости границ $h(r)$ области пространства, в котором выполняются рекомендации ВМО [1, с.1. 12–38] по Δh (рис.1,а) и Δp (рис.1,б), в плоскости разреза по вертикальной оси, исходящей из точки расположения РЛС. Диаграммы рассчитаны для $S_{\Sigma}(\alpha) = 0,15^\circ, 0,1^\circ, 0,05^\circ$; $S_{\Sigma}(l) = 30$ м. Они ограничивают области пространства, внутри которых Δh и Δp не превышают пределов, рекомендуемых ВМО.

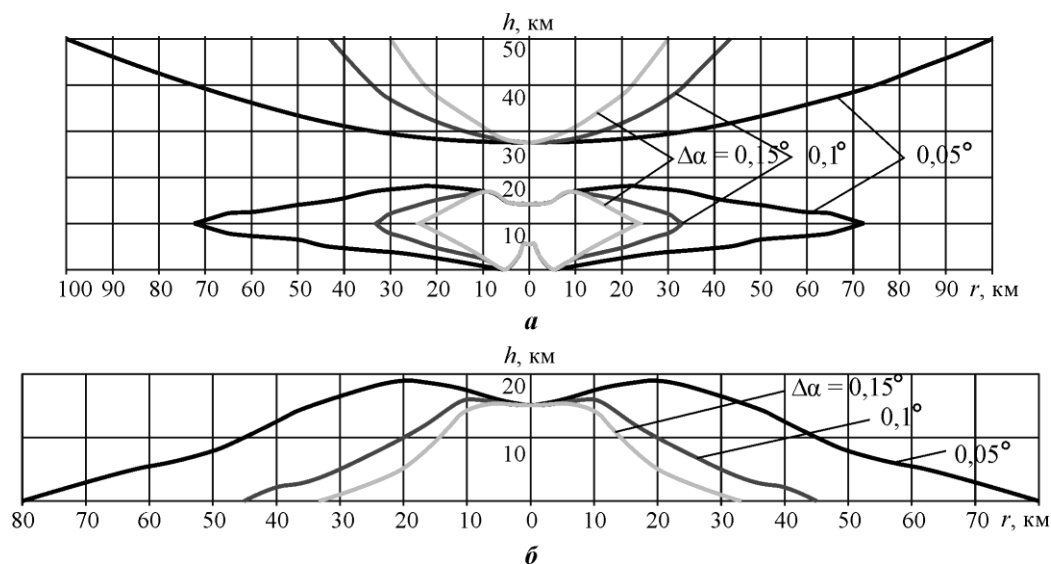


Рис.1. Диаграммы, ограничивающие области пространства, в которых выполняются рекомендации ВМО: а – по Δh ; б – по Δp

Такое представление результатов анализа позволяет оперативно оценить ряд характеристик РЛС как СИ по назначению и их влияние на работу аэрологической сети:

- реальные диапазоны дальности и высоты действия РЛС, за пределами которых получаемые результаты измерений представляют малую ценность (negligible value в [1, с.1. 12–38]) для достижения установленной цели, в данном случае синоптического исследования;
- фактическую степень покрытия территории «удовлетворительно сшивающимися» картами барической топографии;
- дополнительные погрешности значений температуры и влажности на синоптических картах из-за наличия погрешностей Δh и Δp ;
- влияние средней скорости горизонтального перемещения зонда из-за ветра на погрешности измерений метеовеличин на заданных высотах.

Совмещением диаграмм на рис.1 получена диаграмма, ограничивающая область пространства, в которой удовлетворяются рекомендации ВМО по Δh и Δp совместно (рис.2). На основе этой диаграммы рассчитаны зависимости полезного интервала времени $\Delta t_{\text{п}}$ полета зонда, в течение которого удовлетворяются требования по Δh и Δp , в зависимости от горизонтальной скорости перемещения зонда $v_{\text{Г}}$ из-за ветра при стандартной скорости подъема $v_{\text{В}} = 5 \text{ м/с}$ для $S_{\Sigma}(l) = 30 \text{ м}$, $S_{\Sigma}(\alpha) = 0,15^{\circ}, 0,1^{\circ}, 0,05^{\circ}$ (рис.3).

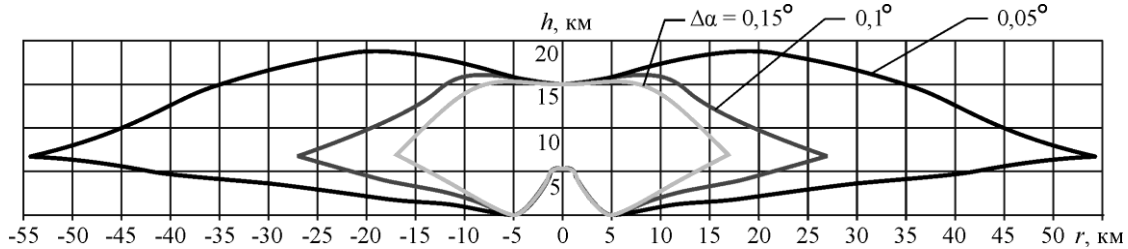


Рис.2. Совмещенные диаграммы погрешностей высоты и давления

Анализ зависимостей на рис.2 и 3 показал следующее:

- имеются большие доли пространства, входящие в нормируемую зону дальности РЛС МАРЛ-А, Вектор-М (при $l \leq 200 \text{ км}$), где Δh и Δp больше предельных значений, при которых результаты измерений h, p не представляют ценности;
- при достижении предельных значений Δh и Δp , реализуемых при нормируемых $S_{\Sigma}(\alpha)$ и $S_{\Sigma}(l)$, результаты совместных измерений взаимосвязанных зависимостей метеовеличин термобарического поля на заданных уровнях атмосферы уже при $l > 30 \text{ км}$, $h > 16...20 \text{ км}$ отягощаются весомыми дополнительными погрешностями Δp и температуры ΔT ;

- «полезный» интервал времени полета зонда $\Delta t_{\text{п}}$, когда Δh и Δp соответствуют рекомендациям ВМО, составляет 40–50 мин при слабом ветре, но уменьшается до $\Delta t_{\text{п}} < 5 \text{ мин}$ при $v > 25 \text{ м/с}$, $\Delta \alpha \geq 0,1^{\circ}$;

- реальная дальность действия РЛС $l_{\text{max}} = \Delta t_{\text{п}} v_{\text{Г}}$ составляет от 20 км при $\Delta \alpha = 0,15^{\circ}$ до 50 км при $\Delta \alpha = 0,05^{\circ}$, если $\Delta l = 30 \text{ м}$.

Следует отметить, что при анализе не учитывались составляющие суммарной погрешности $S_{\Sigma}(\alpha)$ из-за зазоров в кинематической схеме привода антенны, для которых в [6] нет численных оценок. Эти составляющие обусловлены отклонением от вертикали оси антенны при вращении ее по азимуту и углом между направлением максимума и равносигнальной линии диаграммы направленности антенны. Кроме того, в [6] не анализируются составляющие из-за изменений дискрета и случайной погрешности отсчета значений α , а также неадекватности методики поверки, содержащей указание измерять α в одном направлении по азимуту, в то время как необходимо определять угол с гори-

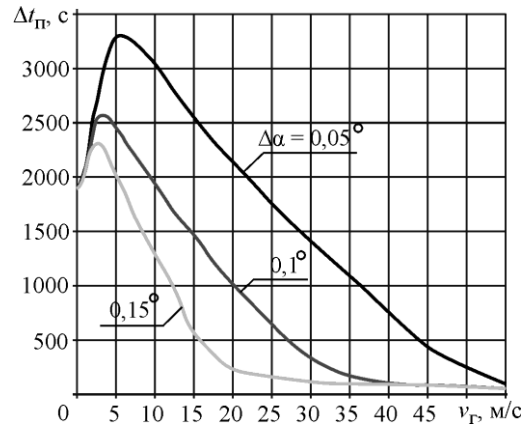


Рис.3. Зависимость полезного интервала времени полета зонда $\Delta t_{\text{п}}$ от горизонтальной скорости перемещения зонда $v_{\text{Г}}$

зонтальной плоскостью (в диапазоне 0–360°). Очевидно, что с учетом перечисленных составляющих значение $S_{\Sigma}(\alpha)$ будет несколько больше, чем получено при анализе.

Заключение. Рассмотрение системы РЛС + радиозонд в целом как СИ и анализ погрешностей позволили оценить влияние инструментальных погрешностей РЛС на погрешности Δh , Δp и адекватность нормируемых значений Δl и $\Delta \alpha$ допускаемым значениям погрешностей Δh и Δp , за пределами которых ценность результатов ничтожна [1, с.1. 12–38].

Представленный анализ полезен для гармонизации требований к РЛС по критерию максимальной эффективности использования РЛС по дальности и высоте с требованиями к инструментальным погрешностям измерений l и α .

На основе декомпозиции нормированного значения предела допускаемой погрешности Δh используемая методика может быть рекомендована для обоснованного установления пределов допускаемых основных составляющих систематических и случайных погрешностей для РЛС как СИ: установки нуля шкалы измерений угла места (горизонтирования); измерения угла между направлением равносигнальной линии или максимума диаграммы направленности и горизонтом; измерения наклонной дальности; отклонения оси вращения антенны от вертикали при вращении по азимуту; дискретности угла сканирования фазированной решетки.

При ограниченной точности РЛС как СИ высоты измерительную систему полезно доукомплектовать в процессе эксплуатации некоторым ограниченным количеством радиозондов, содержащих СИ прямых измерений давления, для периодического контроля стабильности инструментальной погрешности измерений значений h , применяемых для расчета значений p .

Учитывая длительный срок службы, в руководство по эксплуатации РЛС следует включить требование проводить периодическую калибровку или поверку РЛС как СИ высоты с регламентированным межповерочным интервалом. В качестве рабочего эталона полезно применять зонды, содержащие измеритель высоты с использованием системы ГЛОНАСС. При этом поверку РЛС как измерителя высоты непосредственным сравнением с измерителем ГЛОНАСС следует проводить минимум при трех направлениях, равностоящих по азимутальным углам, определяя систематическую погрешность РЛС по углу места, поправку к показаниям РЛС и случайную погрешность измерений.

Несмотря на то что СИ метеовеличин для карт барической топографии относятся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, действующие документы [5, 6], в отличие от руководства ВМО [1], не содержат требований обеспечения единства измерений высоты и давления и нормирования показателей точности, методов оценивания влияния погрешностей СИ координат на погрешности измерений метеовеличин. Принятые в [6] способы нормирования МХ РЛС отличаются от рекомендаций ГОСТ 8.009 [3], хотя в [5] уже предпринималась попытка согласовать способы нормирования МХ измерителей температуры и влажности с ГОСТ 8.009.

Литература

1. Guide to meteorological instruments and methods of observation // World Meteorological Organization (WMO). – 2006. – N. 8. – 569 p.
2. **Боровков А.С., Чуйко В.Г.** Погрешность градуировки термисторного измерителя температуры аэрологического радиозонда // Измерительная техника. – 2014. – № 6. – С. 37–42.
3. ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Стандартинформ, 2006. – 26 с.

4. **Фридзон М.Б., Ермошенко Ю.М.** Радиозондирование атмосферы // Мир измерений. – 2009. – №7. – С. 16–21.
5. Положение о метрологическом обеспечении аэрологических наблюдений. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – М., 2007.
6. Временные методические указания по производству радиозондирования атмосферы системой МАРЛ-А - МРЗ-ЗАТ. Руководящий документ. РД 52.11.652 - 2003. – 25 с.
7. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 180 с.
8. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2006. – 26 с.

Статья поступила
13 апреля 2016 г.

Боровков Александр Сергеевич – инженер кафедры микроэлектронных радиотехнических устройств и систем МИЭТ. *Область научных интересов:* радиоизмерения, метрология; решение измерительных задач и разработка программ для ЭВМ, предназначенных для удаленного управления измерительными приборами и установками с целью автоматизации процесса измерения. **E-mail:** alex101787@mail.ru

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2015 гг.,
аннотациями и содержанием последних номеров на русском
и английском языках можно ознакомиться на нашем сайте:

<http://www.miet.ru>