

УДК.621.396

## К МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ СИСТЕМЫ СЕТЕВОГО АЭРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Ю.М. ЕРМОШЕНКО, М.Б. ФРИДЗОН

Радиозондирование атмосферы на аэрологической сети Росгидромета является основным источником получения метеорологической информации, необходимой для обеспечения безопасной и экономически обоснованной деятельности гражданской авиации.

**Ключевые слова:** система зондирования, методика аттестации, средство измерений.

Сведения о метеопараметрах - температуре, влажности, направлении и скорости ветра, давлении воздуха на различных высотах, наличии осадков и т.д., а также прогноз их изменений во времени и пространстве в тропосфере и стратосфере необходимы как для оперативного обслуживания многих отраслей народного хозяйства, в особенности, полётов воздушных судов (ВС), так и для климатического описания состояния и изменений обитаемой природной среды. Основным способом получения информации о стратификации свободной атмосферы и динамике её изменений является сетевое радиозондирование атмосферы.

Сетевым радиозондирование является именно потому, что на всей поверхности Земли, во всех странах, и, в частности, на территории России, располагаются наблюдательные аэрологические сети. Сети состоят из стационарных аэрологических станций, работающих по единому алгоритму под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО). В РФ в настоящее время функционируют 110 аэрологических станций. Измерения температуры и влажности атмосферы производятся контактным методом с помощью системы радиозондирования, состоящей из выпускаемого в свободный полёт на наполненной лёгким газом латексной оболочке радиозонда и сопровождающей радиозонд наземной станции. Радиозонд снабжен контактными датчиками температуры и влажности. Наземная станция является не только приёмником телеметрических сигналов от радиозонда и обрабатывающим вычислительным устройством, но и непосредственным средством измерения координат радиозонда, в частности, высоты с которой поступает телеметрия, а также параметров ветра на различных высотах в атмосфере. Параметры ветра измеряются косвенным методом путём последовательных измерений местоположения радиозонда. Используемая на аэрологической сети РФ в настоящее время система радиозондирования атмосферы «радиолокационная станция (РЛС) МАРЛ-радиозонд (прибор различных марок различных производителей) является системой, в которой угловые координаты (азимут и угол места) зонда измеряются методом равносигнальной зоны, а наклонная дальность ( $R_n$ ) – радиолокационным импульсным методом с помощью размещенного на зонде сверхрегенеративного приемо-ответчика, выполняющего одновременно функции телеметрического передатчика [1].

Высота  $H_p$  радиозонда с учетом кривизны земли и атмосферной рефракции вычисляется по формуле  $H_p = \frac{R_H^2}{2R_3} + R_H \sin(\epsilon + \Delta\epsilon)$ , где  $R_3 = 6371$  км – радиус Земли.

Поправка  $\Delta\epsilon$  на угол места вычисляется по формуле [2]:

$\Delta\epsilon = \arctg \frac{\cos \tau - \sin \tau \cdot \tg \epsilon_k - n/n_s}{(n/n_s) \tg \epsilon_u - \sin \tau - \cos \tau \cdot \tg \epsilon_k}$ , где  $\epsilon_u$  – измеренный угол места,  $\tau$  – угол

искривления траектории луча в отдельном слое  $\tau_{1,2} = - \int_{-n_1}^{n_2} \ctg \epsilon_k \frac{dn}{n}$ ,  $n = 1 + kp$  –

коэффициент преломления воздуха,  $\rho = f(H)$  - плотность среды,  $n_s$  - эффективное значение коэффициента преломления в слое,  $k$  - постоянный коэффициент для среды.

Таким образом, отечественная система радиозондирования атмосферы, получившая название «Аэрологический радиолокационный вычислительный комплекс (АРВК)», непосредственно измеряющая параметры атмосферы и координаты места нахождения радиозонда является сложной информационно-измерительной системой (ИИС) [3] и в соответствии с [4] должна быть аттестована (утверждена как тип СИ). Это тем более необходимо, так как результаты радиозондирования непосредственно используются для обеспечения безопасности полётов авиации и экономики её деятельности, а также поступают в Государственный информационный фонд и международный обмен данными.

В настоящее время в отечественном радиозондировании наблюдается парадоксальная метрологическая ситуация. Дело в том, что часть ИИС радиозондирования, а именно радиозонд, прошёл испытания с целью утверждения типа СИ и все радиозонды проходят первичную и, при необходимости, последующие поверки (межповерочный интервал для радиозонда как СИ составляет 2 года) [3] в аккредитованных органах Росстандарта. Вторая неотъемлемая часть системы - АРВК до сих пор не аттестована в качестве средства измерений координат, в частности, высоты радиозонда, т.е. высоты, с которой поступают результаты телеметрических измерений и на которой производятся измерения параметров ветра.

Причина такой ситуации заключается в следующем. Испытания с целью утверждения типа СИ в системе Росстандарта методологически базируются на прямом сравнении испытуемых рабочих СИ с соответствующим государственным эталоном того или иного разряда в рабочем диапазоне измерений рабочих СИ [4, 5]. К сожалению, государственных эталонов для проведения испытаний АРВК с целью утверждения типа СИ не существует. Результаты испытаний путём сравнения отечественных АРВК с зарубежными системами зондирования, в особенности, с навигационными, во-первых, не могут быть признаны легитимными, хотя бы потому, что сами эти системы не исследованы в плане метрологии и метрологического обеспечения и не аттестованы как СИ. Как оказалось при ближайшем рассмотрении [6, 7, 8, 9, 10] использование спутниковой радионавигационной системы (СРНС) для местоопределения радиозонда в полёте, в особенности, его высоты в атмосфере, не позволяет без специальных ухищрений, очень дорогой аппаратуры и высококвалифицированного обслуживания достигнуть точности, превышающей радиолокационную [2], то есть лучшей нескольких десятков метров. Во-вторых, проведение таких сравнений в настоящее время сопряжено со значительными (практически не преодолимыми) техническими и экономическими трудностями.

Ниже излагается методика метрологической аттестации [11] (проведения испытаний АРВК, с целью утверждения типа СИ, основанная на широко используемом в авиации барометрическом методе определения высоты воздушного судна [12]. Для реализации этого метода был разработан и изготовлен специальный радиозонд, имеющий на борту аттестованный органом Росстандарта высокоточный обогреваемый датчик давления и устройство, обеспечивающее синхронизацию времени на борту радиозонда и в АРВК. Как показали испытания такого радиозонда в ФГБУ Ростест-Москва, точность (предел допускаемого значения погрешности) измерений атмосферного давления таким радиозондом составляет от 1,0 гПа на уровне 1000 гПа до 0,15 гПа на уровне 100 гПа. Это позволяет определять высоту радиозонда с погрешностью не более 8-9 м, что вполне достаточно для решения поставленной задачи. Методика расчётов при проведении испытаний с целью утверждения типа СИ основывается на использовании полной барометрической формулы Лапласа [13]:

$$z_2 - z_1 = 18400(1 + 0,00366t) \left[ 1 + 0,378 \left( \frac{e}{p} \right) \right] \cdot (1 + 0,00264 \cos 2\varphi) (1 + 3,14 \cdot 10^{-7} h) \lg \frac{p_1}{p_2}, \text{ где } \left( \frac{e}{p} \right)$$

– средние арифметические значения отношения величин абсолютной влажности и давления воздуха для рассматриваемого слоя воздуха,  $\varphi$  – широта места,  $h$  – высота над уровнем моря.

Эта формула позволяет точно определить разность высот  $z_2 - z_1$  между двумя уровнями в атмосфере, давление в которых  $p_2$  и  $p_1$ .

Формула Лапласа является наиболее точной барометрической формулой. Единственным источником погрешности в определении давления, является замена так называемой средней барометрической температуры слоя воздуха на среднюю арифметическую для верхней и нижней границ слоя, причём, для слоев толщиной до 5 км и при значениях вертикального температурного градиента менее  $(\gamma = 1^\circ / 100 \text{ м})$  эта погрешность не превышает 1 гПа [11]. Расчёт проводится для стандартной атмосферы ГОСТ 4401 – 81, характеризующейся распределением метеорологических элементов по высоте, близким к среднему их распределению в реальной атмосфере. Для такой атмосферы принимается, что температура убывает до высоты 11 км линейно с градиентом 0,0065 /м, а выше 11 км до высоты 30 км она остается неизменной и равной 216,5°K, или -56,5°С.

С целью исключения систематической погрешности измерения температуры расчёт ведётся по слоям толщиной не более 1 км. Параллельно с измерением давления АРВК производит измерения высоты радиозонда стандартным способом, используемым при обычном сетевом зондировании [14]. Разность измеренных таким способом высот радиозонда на различных уровнях в атмосфере является с учётом погрешности датчика давления погрешностью измерения высоты радиозонда АРВК.

Обратный переход от высоты к наклонной дальности при фиксированной точности измерения вертикального и горизонтального углов АРВК (точность определения углов АРВК проверяется в стационарных условиях по наземным высотным объектам) позволяет определить погрешность измерения параметров ветра АРВК.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков В.И., Кузенков А., Юрманов В.А. Системы зондирования атмосферы. Л. Гидрометеиздат. 1977. -304с.
2. В.Э.Иванов, М.Б.Фридзон, С.П.Ессяк. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и использования радиозондовых измерительных средств. НИСО УрО РАН Екатеринбург.2004.- 590с.
- 3.Фридзон М. Метрология радиозондирования атмосферы {Методология и достоверность результатов радиозондирования атмосферы}. LAP LAMBERT Akademic Publishing GmbH Co. KG Dudweiler Landsnr. 99, 66123 Saarbrücken. Deutschland. 2011 – 288с-
- 4.ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН РФ «ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ» 26 июня 2008 г. N 102-ФЗ
5. ГОСТ 1.25–76 «ГСС. Метрологическое обеспечение. Основные положения». М., Изд. стандартов, 1983. –11с.
6. Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М. Влияние отражений от подстилающей поверхности на качество функционирования аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем. Сборник научных работ XV Международной научно-практической конференции «Современные концепции научных исследований», ЕСУ, №6(15), ч. 2, Технические науки, Москва,25-27 июня 2015г,80 – 84.
7. Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М. Уменьшение влияния неустойчивости опорного генератора в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем на точность навигационных определений путём расширения вектора измерений. Национальная ассоциация ученых (НАУ). VII Международная научно-практическая конференция: «Отечественная наука в эпоху изменений – постулаты прошлого и теории нового времени». ч.3, Ежемесячный Научный Журнал №2 (7)/2015, с 65 – 68.
8. Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М. Улучшение точностных и динамических характеристик систем синхронизации средств связи и навигации воздушного судна при управлении его движением с АЗН в условиях интенсивных помех. Евразийский союз ученых (ЕСУ), Ежемесячный Научный Журнал №4 (13)/2015, ч. 4, с 15 – 19.

9. Yevtushenko O., Ermoshenko J. Reducing the influence of geometrical factors on the functioning of the equipment consumers SRNS by improving the filtering algorithm navigation parameters (Уменьшение влияния геометрического фактора на качество функционирования аппаратуры потребителей СРНС путём совершенствования алгоритма фильтрации навигационных параметров). (Russian Federation). International scientific review. 2015 № 1 (2). «International scientific and practical conference Problems and prospects exact and mathematical sciences» Novosibirsk 26 – 27 march 2015, с 27 – 29.
10. Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М. Модели динамики движения ВС и навигационных измерений в аппаратуре потребителей СРНС. Материалы XI Международной научно-практической конференции «Naukowa przestrzen Europy – 2015», 07 – 15 kwientinia 2015, v. 26, Techniczne nauki. Przemysl.Nauka I studia 2015, с 59 - 61
11. ГОСТ 8.010-72. «ГСИ. Общие требования к стандартизации и аттестации методик выполнения измерений». –М., Изд. стандартов, 1983. –3с.
12. Тверской П.Н. Физика атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1962,- 700с
13. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. - 339 с.
14. РД 52.11.650-2003 Наставление гидрометеорологическим станциям постам. Вып.4 ч.III Температурно-ветровое зондирование *атмосферы*. СПб. Гидрометеиздат. 2004, -311с.

**Technique of metrological certification of system of network  
aerological radio sounding of the atmosphere.**

***Ermoshenko Y.M., Fridzon M.B.***

Atmosphere's radio sounding in the aerological network of Roshydromet is the main source for obtaining meteorological information, necessary for safe and economically feasible activity of civil aviation.

Nowadays, owing to various objective reasons, the task on approval of the radiosonde measuring system as measurement devices is not solved. The testing procedure of radio sounding system, for the purpose of the SI pattern's approval, based on the barometric method of height measurement in the atmosphere, is offered in the article.

**Keywords:** sounding system, the method of certification, measuring device.

**REFERENCES**

1. Ermakov V.I., Kuzenkov A., YUrmanov V.A. Sistemy zondirovaniya atmosfery. L. Gidrometeoizdat. 1977. -304s.
2. V.EH.Ivanov, M.B.Fridzon, S.P.Essyak. Radiozondirovanie atmosfery. Tekhnicheskie i metrologicheskie aspekty razrabotki i ispol'zovaniya radiozondovyh izmeritel'nyh sredstv. NISO UrO RAN Ekaterinburg.2004.- 590s.
- 3.Fridzon M. Metrologiya radiozondirovaniya atmosfery {Metodologiya i dostovernost' rezul'tatov radiozondirovaniya atmosfery}. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH Co. KG Dudweiler Landsnr. 99, 66123 Saarbrucken. Deutschland. 2011 – 288с-
- 4.FEDERAL'NYJ ZAKON RF «OB OBESPECHENII EDINSTVA IZMERENIJ» 26 iyunya 2008 g. N 102-FZ
5. GOST 1.25–76 «GSS. Metrologicheskoe obespechenie. Osnovnye polozheniya». M., Izd. standartov, 1983. –11s.
6. Evtushenko O.A., Ermoshenko YU.M. Vliyanie otrazhenij ot podstilayushchej poverhnosti na kachestvo funkcionirovaniya apparatury potrebitelej sputnikovyh radionavigacionnyh sistem. Sbornik nauchnyh rabot HV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye koncepcii nauchnyh issledovanij», ESU, №6(15), ch. 2, Tekhnicheskie nauki, Moskva,25-27 iyunya 2015g,80 – 84.
7. Evtushenko O.A., Ermoshenko YU.M. Umen'shenie vliyaniya nestabil'nosti opornogo generatora v apparature potrebitelej sputnikovyh radionavigacionnyh sistem na tochnost' navigacionnyh opredelenij putyom rasshireniya vektora izmerenij. Nacional'naya asociaciya uchenyh (NAU). VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya: «Otechestvennaya nauka v ehposhu izmenenij – postulaty proshlogo i teorii novogo vremeni». ch.3, Ezheimesyachnyj Nauchnyj ZHurnal №2 (7)/2015, s 65 – 68.
8. Evtushenko O.A., Ermoshenko YU.M. Uluchshenie tochnostnyh i dinamicheskikh harakteristik sistem sinhronizacii sredstv svyazi i navigacii vozdushnogo sudna pri upravlenii ego dvizheniem s AZN v usloviyah intensivnyh pomekh. Evrazijskij soyuz uchenyh (ESU), Ezheimesyachnyj Nauchnyj ZHurnal №4 (13)/2015, ch. 4, s 15 – 19.

***К метрологической аттестации системы сетевого  
аэрологического радиозондирования атмосферы***

---

9. Yevtushenko O., Ermoshenko J. Reducing the influence of geometrical factors on the functioning of the equipment consumers SRNS by improving the filtering algorithm navigation parameters (Umen'shenie vliyaniya geometricheskogo faktora na kachestvo funkcionirovaniya apparatury potrebitel' SRNS putyom sovershenstvovaniya algoritma fil'tracii navigacionnyh parametrov). (Russian Federation). International scientific review. 2015 № 1 (2). «International scientific and practical conference Problems and prospects exact and mathematical sciences» Novosibirsk 26 – 27 march 2015, s 27 – 29.

10. Evtushenko O.A., Ermoshenko YU.M. Modeli dinamiki dvizheniya VS i navigacionnyh izmerenij v apparature potrebitel' SRNS. Materialy H1 Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Naukowa przestrzen Europy – 2015», 07 – 15 kwientinia 2015, v. 26, Techniczne naukl. Przemysi.Nauka I studia 2015, s 59 - 61

11. GOST 8.010 72. «GSI. Obshchie trebovaniya k standartizacii i attestacii metodik vypolneniya izmerenij». – M., Izd. standartov, 1983. –3s.

12. Tverskoj P.N. Fizika atmosfery. L., Gidrometeoizdat, 1962, - 700s

13. Bogatkin O.G. Osnovy aviacionnoj meteorologii SPb.: Izd.

RGGMU, 2009. - 339 s.

14. RD 52.11.650-2003 Nastavlenie gidrometeorologicheskim stanciyam postam. Vyp.4 ch.SH Temperaturno- vetrovoe zondirovanie atmosfery. SPb. Gidrometeoizdat. 2004, -311s.

**Сведения об авторах**

**Ермошенко Юлия Марковна** окончила МИИТ по специальности «Математическое обеспечение ЭВМ» (1996 г.) и по специальности «Юриспруденция» (2003 г.), заместитель генерального директора по технике и юридическому сопровождению производства ООО «Аэроприбор», автор 25 научных работ, область научных интересов – радиозондирование атмосферы.

**Фридзон Марк Борисович** (1936 г.р.) окончил Казанский государственный университет (1960 г.), доктор технических наук, доцент, заведующий НИЛ-4 МГТУ ГА, автор более 120 научных работ, область научных интересов – радиозондирование атмосферы.