

УДК 551.501.8:621.396.96

В.М. Карташов, С.И. Бабкин, Е.Г. Толстых

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

*Рассмотрены подходы к проведению метрологической аттестации средств дистанционного зондирования атмосферы, использующих электромагнитные и (или) акустические волны. На примере систем радиоакустического зондирования атмосферы показано, что достаточно объективной характеристикой точности таких средств могут стать метрологические характеристики составляющих их устройств, которые вносят наибольшие погрешности в результаты измерения метеорологических величин.*

**Ключевые слова:** радиоакустическое зондирование, метрологическая аттестация, атмосфера, акустический локатор.

### Введение

Вторая половина XX века характеризуется широким внедрением в практику метеонаблюдений электронных и радиоэлектронных средств. Обычным стало применение радиолокаторов для измерения скорости ветра в высоких слоях атмосферы, регистрации конвективных движений в ее нижних слоях, обнаружения грозových очагов, оценки интенсивности выпадения осадков, слежения за торнадо и т.д.

Развитие радиоэлектронных средств дистанционного зондирования атмосферы получило дополнительный импульс в связи с выполненными в 30-60-ых годах прошлого столетия исследованиями по распространению звуковых волн в атмосфере. На базе этих исследований возникли новые методы дистанционного мониторинга атмосферы – акустическое зондирование (АЗ) и радиоакустическое зондирование (РАЗ). С использованием методов АЗ и РАЗ были созданы способы и технические средства количественного измерения основных метеорологических величин - температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра [1-2]. Однако широкого внедрения в практику метеорологических наблюдений и исследований по физике атмосферы эти методы и средства пока не нашли.

В большинстве своем такие средства являются нестандартизованными средствами измерения и для оценки достоверности получаемой с их помощью метеорологической информации (например, на предмет пригодности ее для использования в синоптических расчетах), необходимо иметь методики метрологической аттестации для каждого вида измерительных устройств. Отсутствие на сегодняшний день таких методик метрологической аттестации не позволяет корректно сравнивать между собой результаты измерений, выполненных разными экспериментаторами, ставит под сомнение трактовку и объяснение ими процессов, происходящих в

атмосфере, не дает возможности единого подхода к проектированию средств дистанционного зондирования того или иного класса.

### 1. Подходы к созданию методик метрологической аттестации дистанционных средств зондирования атмосферы

Дистанционные методы получения метеорологической информации базируются на регистрации тем или иным способом особенностей распространения электромагнитных и (или) акустических волн в атмосфере. Эффективность того или иного дистанционного метода зондирования атмосферы зависит от того, насколько точно регистрируется выделяемый эффект взаимодействия волны с атмосферой.

Дистанционное зондирование атмосферы может решать две задачи:

индикацию качественного состояния атмосферы (томографию);

проведение количественных измерений в ней.

В первом случае характеристики точности дистанционного средства зондирования существенной роли не играют, в то время как для проведения количественных измерений метрологическая аттестация измерительного средства становится важнейшей задачей.

Требования, предъявляемые потребителями метеорологической информации, получаемой с помощью измерительных систем вообще, показывают, что нормируемой метрологической характеристикой таких систем должна быть погрешность измерения метеорологической величины. Опыт длительной эксплуатации экспериментальных систем РАЗ и акустических локаторов, созданных для дистанционной регистрации основных метеорологических величин – температуры и влажности воздуха, скорости и направления, и использование полученной

информации в натуральных экспериментах [1,2] указывают на справедливость данного тезиса.

Погрешность определения высоты, на которой производятся измерения, зависит от точности воспроизведения временного интервала, в течение которого зондирующий пакет распространяется по трассе, и скорости пакета на ней. Скорость пакета априори неизвестна (ее значение по трассе часто принимается равным приземному значению), поэтому эта характеристика не может быть нормируемой. Что касается времени измерения метеорологических величин средствами дистанционного зондирования, то это время должно укладываться в традиционные для метеорологии интервалы – 1 мин, 10 мин, 1 час и т.д. (по крайней мере, на первых этапах внедрения таких средств в практику метеонаблюдений). Отметим, что эта техническая характеристика и ее погрешность для радиоэлектронных средств дистанционного зондирования атмосферы вовсе не являются проблемными.

Метрологическую аттестацию дистанционных средств зондирования атмосферы, как и других средств измерений, можно проводить несколькими путями: расчетным путем, путем экстраполяции структурной функции по данным практических измерений и путем сравнения (сличения) с эталоном. К настоящему времени известен ряд систем радиоакустического зондирования, позволяющих исследовать вертикальное распределение температуры воздуха и измерять скорость и направление ветра вплоть до верхней границы стратосферы, проводить измерение влажности воздуха при слабой турбулентности атмосферы. При извлечении метеорологической информации из данных зондирования в системах РАЗ используются такие параметры отраженного сигнала:

- амплитуда,
- доплеровский сдвиг частоты или его фаза.

Естественно предположить, что метрологические характеристики систем РАЗ должны быть связаны с этими параметрами сигнала, и чем лучше метрологические характеристики системы, тем точнее измеряются параметры сигнала и тем точнее проводятся измерения.

Для сертификации аппаратуры РАЗ, создаваемой с целью измерения той или иной метеорологической величины, необходимо корректно выбрать и обосновать нормируемую метрологическую характеристику.

При организации метрологической аттестации необходимо решить вопрос о том, как проводить аттестацию: системы РАЗ в целом или ее основных устройств – радиопередатчика, радиоприемника, генератора мощных импульсов в атмосфере, измерителя информационного параметра принятого радиосигнала, регистратора.

## 2. Проблема метрологической аттестации систем радиоакустического зондирования атмосферы

Исследования с использованием метода РАЗ специалисты ХНУРЭ всегда вели в сопровождении ученых-метеорологов, проводя на разных этапах исследований сравнительные измерения метеорологических величин штатными датчиками и экспериментальной аппаратурой радиоакустического зондирования [3].

Приведенные здесь экспериментальные данные сравнительных измерений достаточно хорошо согласуются с расчетными данными. Определение погрешности измерений температуры воздуха по результатам экстраполяции структурной функции по данным практических измерений приводит примерно к таким же значениям погрешности [4].

Для передатчика и приемника доплеровской РЛС, использующих обычные фильтры, получен вид спектральной плотности флуктуаций частоты, позволившей рассчитать погрешность в измерении скорости звука, равную  $\sigma^2 C \approx 0,2(m/c)^2$ , а среднеквадратическое отклонение -  $\sigma C \approx 0,4m/c$ . В дальнейших оценках значений погрешности примем ее большее из двух полученных значений, обусловленных нестабильностью частоты передатчика.

Погрешности измерений скорости звука за счет не идеальности других узлов аппаратуры радиоакустического зондирования (радиоприемного устройства со следящим фильтром, блока измерения и регистрации частоты доплеровского сдвига и пр.), а также флуктуационного характера отраженных сигналов составляют  $\sigma C_{пр} \approx 0,38m/c$ .

Максимальная суммарная погрешность измерения скорости звука доплеровским радиолокатором, построенного по «обычной» структурной схеме, составила  $\Delta C_{\Sigma} \approx 0,71 m/c$ . Эта погрешность измерения скорости звука приводит к погрешности определения температуры  $\sigma T \approx 1,2K$  [5]. Немаловажное значение для обеспечения точности измерения метеорологических величин методом и аппаратурой РАЗ имеют методика зондирования и структура алгоритма обработки данных.

Поскольку погрешность измерения скорости звука доплеровским радиолокатором, обусловленная нестабильностью частоты радиопередатчика, является наиболее существенной из всех рассмотренных, то в основу метрологической аттестации системы РАЗ как температурного зондирования, так и температурно-ветрового зондирования может быть положено значение относительной кратковременной нестабильности частоты опорного генератора.

ра доплеровского радиолокатора. Тогда рассчитанная с использованием значения нестабильности погрешность измерения доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала, определяющая погрешность измеряемой метеорологической величины, становится метрологической характеристикой систем РАЗ температурного и температурно-ветрового зондирования [6]. Измерение относительной кратковременной нестабильности частоты опорного генератора радиолокатора можно проводить в соответствии с ДСТУ 8.129-99, созданным для метрологической аттестации стандартов частоты и времени [7].

В ряде разработанных способов измерения влажности воздуха радиоакустическим зондированием информационным параметром отраженного сигнала служит его мощность при одночастотном зондировании атмосферы [8] или отношение мощностей при двухчастотном зондировании [9]. Такое отношение, например, должно измеряться с погрешностью, меньшей 0,4 дБ [2], для того, чтобы погрешность измерения влажности с помощью аппаратуры РАЗ не превышала 7% – максимально допустимой погрешности штатных датчиков влажности, применяемых на сети метеонаблюдений. При проведении сравнительных измерений относительной влажности двухчастотной аппаратурой РАЗ, датчиками автоматизированного метеорологического комплекса, установленного на 50-метровой мачте, смонтированной на территории Одесского гидрометеорологического института, и радиозонда “МАРЗ-21” получено расхождение результатов измерений в пределах 9-12 % в ночных условиях [2,9]. Поэтому, как и при проведении температурно-ветрового РАЗ атмосферы, полученные значения среднеквадратических отклонений не могут служить в качестве метрологических характеристик применявшейся в экспериментах системы РАЗ. Критерий малой погрешности штатных метеорологических датчиков комплекса и радиозонда, использованных в качестве эталонов, также не выполнялся. Если учесть, что амплитудные радиотехнические измерения являются наименее точными, то проблема метрологической аттестации подобных дистанционных средств измерения влажности становится весьма актуальной, а их эксплуатация должна включать систематическую калибровку трактов радиопередатчика, радиоприемника и генератора мощных акустических импульсов.

Известен также способ радиоакустического определения влажности воздуха, основанный на измерении разности фаз двух акустических колебаний разной частоты, возникающей за счет дисперсии скорости звука во влажном атмосферном воздухе [2]. Источниками погрешности измерения фазового сдвига в системе РАЗ, привлекаемой для дистанционной регистрации профилей влажности воздуха,

являются двухканальные радиопередатчик и радиоприемник, звуковой генератор и акустические излучатели. Именно эти устройства и должны быть подвергнуты метрологической аттестации.

Новым шагом в радиоакустическом зондировании, без преувеличения, стало использование нетрадиционной для данного метода корреляционной обработки отраженных сигналов [10]. При корреляционной обработке сигналов системы РАЗ для извлечения данных о метеорологических величинах из данных зондирования информационным параметром является параметр расстройки условия Брэгга  $q$ . Для определения  $q$  используется амплитуда принятых радиосигналов.

В соответствии с принятой выше концепцией для систем РАЗ с корреляционной обработкой в качестве метрологической величины должна стать относительная среднеквадратическая погрешность измерения амплитуды этих сигналов. Переход к корреляционной обработке требует изменения состава зондирующей аппаратуры, а именно, включение в ее состав блока формирования сетки опорных сигналов, коррелятора, вычитающего устройства и компаратора [11].

### 3. Проблема метрологической аттестации акустических локаторов

В настоящее время известны способы акустического зондирования, позволяющие исследовать термическую структуру пограничного слоя, измерять скорость и направление ветра в нем, проводить регистрацию относительных изменений вертикального распределения температуры воздуха, измерять влажность воздуха. С использованием измерительных метеорологических комплексов ряда высотных устройств и акустических локаторов также были проведены синхронные сравнительные измерения некоторых атмосферных характеристик [12]. Параметрами отраженного сигнала, несущими метеорологическую информацию, в этих локаторах, как и в системах РАЗ, также могут быть амплитуда, доплеровский сдвиг частоты или его фаза. Поэтому к разработке методики метрологической аттестации акустического локатора следует подходить аналогично разработке такой методики для систем РАЗ. Например, как первый шаг к метрологической аттестации, для работы акустического локатора в режиме регистрации термической структуры атмосферы разработана методика его калибровки путем измерения звукового давления на оси антенны в режиме излучения и расчета коэффициента преобразования приемника [13]. В частности, для такого режима работы локатора метрологической аттестации должны подвергаться и устройства, определяющие высоту и толщину слоя зондирования (пространственное разрешение), а также временное разрешение.

## Выводы

1. В настоящее время отсутствуют технические средства измерений, которые могли бы быть использованными в качестве эталонов для метрологической аттестации дистанционных систем зондирования атмосферы, использующих электромагнитные и (или) акустические волны.

2. Метрологическую аттестацию дистанционных средств целесообразно проводить путем метрологической аттестации основных устройств системы, определяющих погрешность измерения информационного параметра отраженного сигнала системы, с учетом того, что суммарная погрешность измерений метеорологической величины, определяемая погрешностями отдельных устройств, в целом не должна превышать заданной для данного средства.

## Список литературы

1. Каллистратова М.А. Радиоакустическое зондирование атмосферы / М.А. Каллистратова, А.И. Кон. – М.: Наука, 1985. – 195 с.
2. Радиоакустическое зондирование атмосферы / Е.Г. Прошкин, С.И. Бабкин, Г.В. Груша и др. // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под ред. Кащеева Б.Л., Прошкина Е.Г., Лазутина М.Ф. – Х.: Коллегиум, 2002. – Раздел 2. – С. 44-98.
3. Определение температуры, скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы / С.И. Бабкин, Г.Н. Милосердова, М.Ю. Орлов и др. // Метеорология и гидрология. – 1980. – 20, № 6. – С. 495-500.
4. Бабкин С.И. О точности измерения скорости звука в атмосфере доплеровским радиолокатором / С.И. Бабкин. – Радиотехника. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Х.: Вища школа, 1979. – Вып. 50. – С. 67-72.
5. Оценка погрешностей двух методик радиоакустического температурного зондирования атмосферы.

Сообщение 2. / С.И. Бабкин, В.И. Куценко, Н.Г. Максимова и др. // Радиотехника. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Х.: Вища школа, 1988. – Вып. 84. – С. 98-105.

6. Бабкин С.И. К вопросу о метрологической аттестации систем радиоакустического зондирования / С.И. Бабкин // Тез. докл. 7-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Суздаль, 1986. – С. 82.

7. ДСТУ 8.129-99. Государственная поверочная схема для средств измерения времени и частоты. – Киев: Держстандарт, 2003. – 4 с.

8. Орлов М.Ю. О возможности определения влажности в приземном слое атмосферы радиоакустическим способом / М.Ю. Орлов, Б.С. Юрчак // Труды ИЭМ Госкомгидромета. – 1985. – № 38/121. – С. 14-20.

9. Измерения влажности воздуха радиоакустическим зондированием атмосферы / С.И. Бабкин, Н.Г. Максимова, А.Ю. Панченко, Е.Г. Прошкин, Ю.Н. Ульянов. – Труды IX Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч.2. Исследование метеопараметров атмосферы. – Томск, 1987. – С. 145-148.

10. Карташов В.М. Двумерная взаимокорреляционная функция акустического и электромагнитного сигналов радиотехнических систем / В.М. Карташов // Радиоэлектроника и информатика. – Х., 2001. – № 1. – С. 6-8.

11. Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для реєстрації вертикального профілю температури / Карташов В.М., Бабкін С.І., Пащенко С.В., Куля Д.М. – Патент України № 97612. Опубл. 27.02.2012, бюл. №4.

12. Лободин В.М. Высотная метеорологическая мачта как средство проверки систем акустического и радиоакустического зондирования / В.М. Лободин, Н.Ф. Мазурин // Труды ИЭМ Госкомгидромета. – 1987. – №10/131. – С. 20-28.

13. Федько С.И. Калибратор акустического локатора / С.И. Федько, М.Г. Фурсов // Труды VIII Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч.2. – Томск, 1984. – С. 206-208.

Поступила в редколлегию 19.03.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Тихонов, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ПРОБЛЕМИ МЕТРОЛОГІЧНОЇ АТЕСТАЦІЇ ЗАСОБІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ

В.М. Карташов, С.І. Бабкін, Є.Г. Толстик

Розглянуто підходи до проведення метрологічної атестації засобів дистанційного зондування атмосфери, що використовують електромагнітні та (або) акустичні хвилі. На прикладі систем радіоакустичного зондування атмосфери показано, що достатньо об'єктивною характеристикою точності таких засобів можуть стати метрологічні характеристики складових їх пристроїв, які вносять найбільші похибки в результати вимірювання метеорологічних величин.

**Ключові слова:** радіоакустичне зондування, метрологічна атестація, атмосфера, акустичний локатор.

## METROLOGICAL CERTIFICATION PROBLEMS OF REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERE

V.M. Kartashov, S.I. Babkin, E.G. Tolstikh

The approaches to implementation metrological certification of remote sensing of the atmosphere using electromagnetic and (or) acoustic waves. On the example of radio acoustic sounding systems of the atmosphere shown that sufficient objective characteristic of the accuracy of such funds can be metrological characteristics of their constituent units which make the largest error in the results of the measurement of meteorological variables.

**Keywords:** radio acoustic sensing, metrological certification, atmosphere, acoustic locator.