

*Е. Г. ПРОШКИН, д-р техн. наук, В. М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук,
С. И. БАБКИН, канд. техн. наук, А. В. ВОЛОХ*

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СИСТЕМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Современное состояние теории и практики систем РАЗ

Системы радиоакустического зондирования (РАЗ), позволяющие дистанционно определять основные метеорологические величины (температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра), являются информативным и перспективным средством метеонаблюдений. В первых системах РАЗ использовались импульсные радио- и акустические сигналы и строились они по моностатической схеме, в которой фазовые центры всех антенн совмещены в одной точке. Длина радиоволны системы температурно-ветрового зондирования ЕМАС [1], созданной в 1961 году, составляла 3 см, длина акустической волны – 1,5 см, а максимальная дальность действия – только 30 м. Полученная дальность разочаровала разработчиков и следующая система РАЗ появилась только в 1972 году. Данная установка температурного зондирования называлась RASS и имела параметры [1]: длина радиоволны – 8,15 м; длина акустической волны – 4,075 м. С помощью этой установки удалось получить отраженный сигнал с высоты 1,5 км, но минимальная высота зондирования составляла 600 м, а пространственная разрешающая способность – 200 м. В большинстве последующих систем РАЗ применялось импульсное акустическое излучение и непрерывное монохроматическое радиоизлучение, использовались отдельные, разнесенные на некоторое расстояние, передающая и приемная радиоантенны. Акустическая антенна, как правило, располагается посередине между радиоантеннами. Такая схема расположения антенн в совокупности с указанной выше комбинацией зондирующих радио- и акустического сигналов (схема построения системы) получила название «основной». К середине 80-х годов прошлого столетия, когда, в основном, сформировались принцип построения и структура доплеровской системы РАЗ, в мире насчитывалось около 10 работающих установок, большинство из которых были построены по основной схеме [1]. Отличия известных установок состояли в используемых диапазонах длин волн, мощностях излучения и числах длин волн в акустическом импульсе, временная длительность которого определяет пространственную разрешающую способность измерений. Все имевшиеся к тому времени системы (кроме РАЗ-10) были стационарными. В качестве передающих и приемных радиоантенн чаще всего использовались параболические зеркальные антенны, в качестве акустических излучателей – решетки динамиков. Некоторые структурные особенности имеет установка РАЗ, разработанная в Харьковском институте радиоэлектроники (ныне ХНУРЭ) [2]. Здесь радио- и акустическая антенны размещаются так же, как и в основной схеме, только на вращающейся платформе, а акустическая антенна, кроме того, может перемещаться в направлении, перпендикулярном линии, соединяющей центры радиоантенн. Сделано это с целью компенсации в небольших пределах ветрового переноса звукового пакета. Работоспособность установки при смещенной акустической антенне обеспечивается путем вращения платформы до появления в приемнике отраженного радиосигнала. Затем акустическую антенну смещают дальше по линии и добиваются получения сигнала из следующей точки профиля. Это позволяет увеличить дальность действия системы и производить измерения скорости и направления горизонтального ветра. Разработанные в дальнейшем системы РАЗ [3-5.] не имеют принципиальных отличий, только в силу возросшей производительности компьютеров в них реализуются дополнительные возможности по обработке и отображению результатов зондирования. Если ранее (в 70-80-е годы) большинство систем РАЗ разрабатывалось группами экспериментаторов и изготавливалось в единичных экземплярах, то позднее (наряду с уникальными, единичными разработками) был начат также мелкосерийный выпуск подобных станций. Разработчиками систем РАЗ, предназначен-

ных для промышленного производства, являются, как правило, те же научные коллективы, которые изготавливают экспериментальные установки для «себя».

Радиоканал систем РАЗ реализуется по схеме «истинной когерентности», когда выходной сигнал радиопередатчика и все гетеродинирующие напряжения приемника формируются от одного высокостабильного задающего генератора путем умножения его частоты в необходимое число раз. Такая схема построения позволяет при использовании задающего генератора, обладающего достаточной кратковременной стабильностью частоты, получать необходимую точность оценок скорости звука в атмосфере. Измеритель доплеровской частоты может быть реализован в аналоговом или цифровом виде. ЭВМ выполняет функции синхронизации, управления и адаптации, а также обработки результатов измерений. Особенность систем РАЗ состоит в необходимости выполнения условия Брэгга, которая диктуется как энергетическими, так и информационными соображениями. При использовании простых акустического и электромагнитного зондирующих сигналов изменение с высотой температуры и радиальной скорости ветра приводит к нарушению соотношения Брэгга. Достаточно сильный отраженный сигнал существует только в некотором диапазоне высот, причем, чем больше длительность акустического импульса, тем меньше этот диапазон [1]. Настройка на условие Брэгга при больших градиентах температуры для каждой из точек профиля («площадок») вручную путем изменения частоты излучаемого звукового сигнала занимает достаточно много времени, которое в зависимости от количества точек профиля может составлять 0,1 – 3 ч [1,2]. Используемый алгоритм измерений значительно ограничивает оперативность получения профилей метеовеличин – качество, являющееся одним из основных достоинств метода РАЗ. Кроме того, такое время соизмеримо со временем квазистационарности процессов в атмосфере, в течение которого можно производить осреднение. В связи с изложенным, с самого начала развития метода РАЗ стали делаться попытки получения профилей «по одной посылке» [1], с установкой частоты акустического генератора для начала, середины и конца всей трассы [2], однако достаточный для уверенной регистрации уровень сигнала даже при благоприятных метеоусловиях удается получить только для нескольких соседних точек профиля. Нарушение условия Брэгга в крайних точках, в которых удается зарегистрировать сигнал, приводит к появлению погрешностей в определении температуры порядка 0,5 – 1,0 °С [1]. Такая погрешность не превышает случайных погрешностей радиозондов, но оказывается коррелированной с градиентом скорости звука, причем градиент всегда занижается по абсолютному значению. И хотя общее время измерения температурного профиля по такой методике значительно уменьшается, однако появляется неслучайная погрешность, которая не может быть уменьшена осреднением и коррекцией результатов измерений. Кардинальным решением вопроса о повышении оперативности РАЗ и точности измерения метеовеличин может стать подстройка частоты электромагнитного излучения под условие Брэгга по мере распространения простого акустического импульса в атмосфере. Разработке таких способов посвящены публикации [1,5] и другие. Поскольку обеспечить выполнение условия Брэгга во всем диапазоне изменения акустических длин волн с помощью подстройки частоты радиосигнала не представляется возможным, то медленные (сезонные и суточные) изменения метеовеличин целесообразно компенсировать подстройкой частоты звукового генератора. Такая периодическая подстройка частоты звука может быть выполнена по результатам прямых измерений температуры и скорости ветра у поверхности земли (автоматически или оператором). Компенсацию быстрых изменений длины акустической волны (в течение времени распространения акустического пакета по трассе зондирования) необходимо производить изменением частоты радиоизлучения. Однако сведения об успешной реализации подобных процедур на практике отсутствуют, что объясняется технической сложностью задачи, с одной стороны, и несовершенством алгоритмов управления частотами зондирующих сигналов – с другой. В системах РАЗ могут применяться дискретные приемные радиоантенны, в том числе и значительных размеров при зондировании до больших высот. Для эффективного использования апертуры решетки передающие электромагнитная и акустическая антенны

могут в этом случае перемещаться при изменении метеоусловий, занимая положение с наветренной стороны, либо используется некоторое количество передающих антенн, которые перемещаются [6]. Разработаны и соответствующие алгоритмы обработки сигналов для такой схемы [6], позволяющие, в частности, оценивать координаты центра пятна рассеянных сигналов, перемещающегося в процессе измерений по апертуре решетки.

Отметим, что все вопросы системного, технического характера, возникающие при разработке систем РАЗ, решались до 2000 года инженерным, экспериментальным путем. После прихода к «основной» схеме построения таких установок усилия разработчиков были направлены на совершенствование различных элементов структуры. Рассматривались возможности использования различных видов антенн, акустических излучателей, радиоприемников, устройств выделения сигнала доплеровской частоты, схем и алгоритмов спектрального анализа. Достаточно удачная комбинация зондирующих сигналов, получившая широкое распространение на практике: импульсный акустический сигнал с синусоидальным заполнением и непрерывный монохроматический радиосигнал – также предложена инженерами. Ряд публикаций научного характера [7-9], посвященных исследованию свойств некоторых типов зондирующих сигналов, появились позднее. Полученные в них результаты подтвердили правильность инженерной интуиции, подсказавшей использование данной комбинации сигналов, и несколько расширили представления о свойствах и возможностях других видов зондирующих колебаний. В упоминавшихся работах использовался достаточно сложный математический аппарат, затрудняющий восприятие излагаемого материала инженерами, занимающимися аппаратурой, и делавший проблематичным его развитие и рассмотрение других видов сигналов. Именно этими обстоятельствами объясняются ошибки и заблуждения, встречающиеся в упоминавшейся литературе, несмотря на высокую квалификацию авторов. О некоторых имевших место заблуждениях говорится также в работе [1]. Аппаратурные задачи имеют небольшой удельный вес среди публикаций, посвященных зондированию атмосферы с использованием звуковых волн, и этот вес постоянно уменьшается [1.5]. Если до 1983 года более чем в 50 % докладов на симпозиумах ISARS рассматривались методические и аппаратурные вопросы, то на последующих симпозиумах таких докладов было менее 10 – 15% (основное внимание в них уделяется ветровым профилерам и комбинированным системам). Остальные сообщения посвящены различным геофизическим проблемам. В докладах ведущих ученых неоднократно высказывалась мнение о том, что разработка вопросов построения систем РАЗ практически завершена и происходит поворот к их практическому использованию. Таким образом, на определенном этапе развития в области разработки систем РАЗ атмосферы сложилась ситуация, когда основными методами проектирования являлись инженерная интуиция, основанная на опыте аналогичных и подобных решений в других областях, и эксперимент. Работы по созданию теории радиоакустических систем по-прежнему не производились, задачи синтеза и оптимизации систем, устройств, сигналов не ставились. Это обусловлено, видимо, тем, что ведущие позиции и научный авторитет в вопросах зондирования атмосферы принадлежат специалистам по атмосфере – физикам и, особенно, радиофизикам, занимающимся вопросами распространения и рассеяния волн в атмосфере, среди которых такие известные имена как Обухов А. М., Татарский В. И., Каллистратова М. А., Кон А. И., Красненко Н. П. и др. Ряд установок РАЗ, особенно содаров, созданы под идейным руководством специалистов данного направления. Вопросы же, связанные с проектированием аппаратуры, решались, в основном, путем заимствования известных решений из радиолокации с учетом метеоусловий и особенностей радиоакустического зондирования. Используемый подход в значительной степени предопределил достигнутые на определенном этапе успехи в развитии метода и систем РАЗ, однако же, он и замедлил последующее развитие данного направления, поскольку далеко не все вопросы системного технического характера в этой области можно эффективно решить таким в силу специфики систем РАЗ. Отдельно в ряду исследований данного направления стоят работы ученых ХНУРЭ, в которых системы РАЗ выступают как объект исследования. Учеными университета созданы основы

построения доплеровских систем данного класса, предложены и исследованы различные схемы обработки сигналов, другие радиоустройства, а разработка и метрологическая аттестация методов измерения параметров атмосферы производится в этих работах с учетом не только геофизических, но и аппаратурных погрешностей. Значительные успехи достигнуты в достаточно близкой к системам РАЗ области – разработке радиолокационных ветровых профилеров (РВП). Ветровой профилер, по существу, представляет собой электромагнитный канал радиоакустической системы, спроектированный и построенный таким образом, чтобы принимать слабые сигналы, полученные от распределенных в пространстве турбулентных неоднородностей. Естественно, что, являясь сложным стационарным (дорогостоящим) сооружением, РВП способен принимать и радиосигнал, рассеянный на когерентной акустической волновой посылке (АВП). Однако, чтобы реализовать заложенные в нем богатые, прежде всего, энергетические возможности при работе с АВП, необходимо в процессе проектирования (или доработки) учитывать появляющиеся системообразующие связи. Поскольку РВП представляют собой РЛС с высоким энергетическим потенциалом, предназначенные для работы по объемно-распределенным целям с очень малым ЭПР, то при использовании в них в качестве рассеивающего объекта когерентной пространственной структуры – АВП, образуется некоторый «избыток» потенциала, позволяющий применить сложный акустический сигнал. Частота радиоизлучения в РВП может быть выбрана постоянной (а не изменяющейся для обеспечения условия Брэгга) [11]. Наиболее часто в РВП используют самое очевидное техническое решение – ЛЧМ звуковой сигнал. Акустические сигналы с широким спектром применяются в настоящее время и в ряде установок РАЗ с «обычным», более низким энергетическим потенциалом радиоканала.

Для создания эффективных систем РАЗ необходима глубокая теоретическая разработка соответствующих вопросов аппаратурного характера с использованием адекватных подходов, поскольку многие вопросы данного направления не содержатся в теории радиолокационных систем.

Изложим кратко основные теоретические результаты, полученные в последнее время, прежде всего учеными ХНУРЭ. Обнаружена закономерность в формировании рассеянного на звуке радиосигнала как взаимная корреляционная функция по дальности излучаемых электромагнитного и акустического колебаний. Закономерность вытекает из известных соотношений, полученных теоретическим путем, и подтверждается многочисленными экспериментальными результатами. Созданы адекватные конструктивные модели информационных локационных каналов – радиоакустического и акустического. Введена двумерная взаимокорреляционная функция акустического и радиосигналов – функция рассеяния, теоретическим путем определены ее основные свойства, выражающие наиболее общие характеристики рассеянных сигналов. Задача рассеяния электромагнитной волны на звуке представлена с помощью аппарата теории сигналов и функционального анализа, вследствие чего значительно повышается конструктивность рассмотрения.

Функция рассеяния, («вобрав» в себя свойства среды взаимодействия и характеристики зондирующих акустического и электромагнитного колебаний, позволяет достаточно просто находить вид рассеянного сигнала, соответствующий разнообразным условиям. Благодаря этому открываются широкие возможности для исследования различных видов зондирующих колебаний и развития теории рассматриваемых систем в целом.

Разработаны методы исследования зондирующих акустических и электромагнитных сигналов. Представление функции рассеяния в различных математических формах и графически в виде поверхностей – тел рассеяния позволяет, используя различные виды сечений тел, осуществлять эффективный анализ зондирующих векторных радиоакустических сигналов. Изучены виды сигналов – наиболее часто используемые на практике и перспективные.

Показано, что применяемые в настоящее время в радиоакустических системах алгоритмы обработки принимаемых сигналов, заимствованные из радиолокации, не адекватны процессам, происходящим в радиоакустическом локационном канале, поскольку не учитывают

изменение структуры сигнала при рассеянии на звуковой посылке. Это приводит к существенному ухудшению показателей качества станций, в частности точности измерения температуры (погрешность может достигать единиц градусов). Для получения оценок максимального правдоподобия измеряемого параметра опорные сигналы в различных точках диапазона возможных значений данного параметра должны отличаться видом, формой, а не являться копией излучаемого радиосигнала, как это принято. Формы опорных колебаний многоканального устройства обработки следует определять с помощью функции рассеяния, отображающей особенности преобразования сигналов в канале.

Синтезированные алгоритмы обработки сигналов можно рассматривать как обобщение результатов теории радиосистем на случай, когда форма сигнала при рассеянии преобразуется по детерминированному закону. Если рассеивающий объект вырождается в точечную цель, то принимаемый и опорный сигналы становятся копией зондирующего, излучаемого радиосигнала. Предложенные процедуры обработки сводятся в этом случае к известным ранее алгоритмам оценивания параметров колебания.

Развитие метода радиоакустического зондирования в ХНУРЭ

Первые сообщения о возможности реализации метода РАЗ атмосферы появились в 1961 году. В опубликованном докладе Смита П. Л. [12] была изложена сущность метода, выполнен анализ системы, рассмотрена возможность измерения скорости и направления ветра с помощью трех, разнесенных в пространстве, систем РАЗ. В докладе Феттера Р. В. [13] излагался принцип построения системы ЕМАС, была приведена структурная схема и результаты ее экспериментальных исследований. Система ЕМАС не оправдала возлагаемых на нее надежд, так как высота зондирования составила лишь 30 м. Результаты энергетического расчета метода РАЗ, полученные в 1962 году Атласом Д. [14], дали слишком завышенные оценки метода. Поэтому метод был признан неперспективным, дальнейшие его исследования были приостановлены и возобновлены лишь через 10 лет, в 1972 году, после обоснования Маршаллом И. М. [15] причин неудачи выполненных в 1961-1962 годах теоретических и экспериментальных исследований метода РАЗ.

В годы, когда метод РАЗ был признан неперспективным, он получил развитие в Харьковском институте горного машиностроения, автоматики и вычислительной техники (ныне Харьковский национальный университет радиоэлектроники). В 1965-1966 годах на кафедре конструирования радиоаппаратуры для исследования рассеяния электромагнитного излучения на звуковых волнах и для проверки критичности дифракции Брэгга при РАЗ атмосферы была создана экспериментальная моностатическая система РАЗ, по существу повторяющая ЕМАС. Система состояла из доплеровского радиолокатора с непрерывным излучением радиоволн частотой 10 ГГц и формирователя звуковых посылок, содержащего источник сжатого воздуха, ресивер, регулятора давления, клапан запуска и свисток Гартмана, излучающий звуковые волны на частоте 22 кГц. Последний размещался в фокусе параболической антенны радиолокатора, которая формировала диаграммы направленности радио и звукового излучений. Экспериментальные исследования данной системы повторили результаты, полученные системой ЕМАС: максимальная дальность зондирования составила 40 м. Было установлено, что газоструйные преобразователи звука, такие как свистки Гартмана и сирены, позволяют получать значительные мощности звукового излучения, однако они не обладают требуемой стабильностью частоты звука, не обеспечивают работу в импульсном режиме и подстройку частоты для выполнения условия Брэгга вдоль трассы зондирования. Для таких устройств требуются мощные компрессоры, особенно при работе систем в дециметровом и метровом диапазонах радиоволн. Поэтому в последующих разработках систем РАЗ, выполненных уже в Харьковском институте радиоэлектроники (ХИРЭ), использовались электродинамические излучатели звука, которые обеспечивают высокую стабильность частоты, работу в импульсном режиме и, практически, безынерционную подстройку частоты для соблюдения условия Брэгга при зондировании. Выполненные в период 1966-1970 годов теоретические исследования метода РАЗ дали следующие результаты.

1. Установлено, что причиной малой дальности обнаружения рассеянных звуковой волной радиосигналов системами ЕМАС и РАЗ-1 (ХИГМАВТ) является большое затухание в атмосфере используемой частоты звуковых волн (22 кГц).

2. Разработан способ наклонного зондирования последовательно в трех направлениях, позволяющий определять высотное распределение температуры воздуха, скорости и направления ветра одной системой РАЗ.

3. Получено уравнение дальности радиоакустического зондирования, в котором учтены технические характеристики системы, затухание звуковых волн в атмосфере и их ветровая рефракция.

На основании этих результатов в 1969 году была создана мобильная бистатическая система РАЗ-2, доплеровский радиолокатор которой работал в непрерывном режиме на частоте 3 ГГц [16]. В качестве излучателя звука использовалась акустическая решетка, состоящая из рупорных громкоговорителей. Система позволяла дистанционно измерять высотное распределение температуры воздуха, скорости и направления ветра в нижнем 100-метровом слое атмосферы с высоким пространственным разрешением. Аппаратура была размещена в кузове автомобиля, на крыше которого была смонтировано антенное устройство. Результаты полевых испытаний системы подтвердили перспективность метода РАЗ для мониторинга атмосферного пограничного слоя.

Исходя из положительных результатов теоретических и экспериментальных исследований в 1971 году Постановлением правительства Украины в ХИРЭ была создана Проблемная научно-исследовательская лаборатория зондирования атмосферы, в которой продолжились исследования метода и систем РАЗ. К сентябрю 1974 года сотрудниками лаборатории было завершено создание макета мобильной 10-см системы РАЗ-3 с внутренней когерентностью и следующими техническими параметрами: мощность радиопередатчика – 0,5 Вт; чувствительность радиоприемника – 10^{-11} Вт; максимальная электрическая мощность генератора акустических импульсов – 1000 Вт. В этой системе РАЗ имелись два режима работы: вертикальное температурное зондирование и наклонное температурно-ветровое зондирование. С ноября 1974 по март 1975 года впервые в мировой практике были проведена сравнительная регистрация вертикальных профилей температуры воздуха, скорости и направления ветра 10-см системой РАЗ и штатными датчиками высотной 300-метровой метеомачты (ВММ) Института экспериментальной метеорологии (ИЭМ, г. Обнинск) на короткой базе (сравниваемые средства измерений находились на расстоянии около 150 м). Максимальная высота вертикального зондирования – 180 м, вид устройства для накопления данных зондирования – малогабаритное печатающее устройство МПУ16-2. Среднеквадратические отклонения результатов сравнительных измерений: по температуре воздуха – (0,1 – 0,5) К; по скорости ветра – (0,2 – 0,6) м/с; по направлению – (1,5– 5)⁰. Такие погрешности метода и аппаратуры РАЗ удовлетворяют практике метеонаблюдений. Была замечена сильная изменчивость вертикальных профилей метеовеличин при их регистрации аппаратурой РАЗ по сравнению с профилями, полученными метеодатчиками. В дальнейшем эта 10-см система РАЗ подверглась существенной модернизации, в результате которой достигнуты следующие параметры: максимальная мощность радиопередатчика – 5 Вт; чувствительность радиоприемника – 10^{-14} Вт; вид накопления данных зондирования – перфолента. С использованием данной системы с ноября 1977 по март 1978 года была проведена вторая серия сравнительных измерений на территории ВММ. Максимальная высота регистрации температуры воздуха – 300 м; скорости и направления ветра – 200 м. По результатам сравнительных измерений были отработаны методики зондирования в различных метеоусловиях, в том числе и при повышенных скоростях ветра. Достигнутые результаты в развитии метода РАЗ позволили использовать модернизированную систему РАЗ-3 для научных исследований по физике атмосферы и для некоторых прикладных задач. Так, в августе 1979 года лаборатория с этой системой приняла участие в экспедиционных обследованиях загрязнения воздушного бассейна в районе алюминиевого завода в Карелии (организатор – Главная геофизическая обсерватория

им. Воейкова, г. Ленинград). В этих экспериментах данные температурного зондирования системой РАЗ-3 сравнивались с данными верголетного зондирования. А с июля по октябрь 1980 года модернизированная система РАЗ-3 использовалась в работах по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (рассеивание континентальных туманов, п. Софиевка Днепропетровской обл.) под эгидой ИЭМ. С ноября 1980 года началась разработка способов зондирования и создание макета двухчастотной системы РАЗ-4 для экспериментов по дистанционному измерению еще одной важной метеовеличины – влажности воздуха. К концу 1982 году создан макет системы РАЗ-4 со следующими характеристиками: длина рабочих волн радиоканала – 10 см и 20 см; максимальная мощность радиопередатчика канала 20 см – 30 Вт; устройство для управления и обработки результатов зондирования – микро-ЭВМ ДЗ-28 «Электроника» с возможностью раздельной работы каналов. В дальнейшем отрабатывались методики зондирования с целью синхронной регистрации температуры и влажности воздуха в разных метеоусловиях. А с мая 1984 года по май 1992 года макет двухчастотной системы РАЗ-4 использовался в исследованиях по рассеиванию теплых приморских туманов (организатор – ИЭМ, г. Одесса). По данным радиоакустического зондирования в экспериментах наблюдалась явная трансформация вертикального температурного профиля на различных стадиях эволюции тумана: возникновении, существовании и разрушении. При выполнении этих исследований были проведены сравнительные измерения температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра вертикальным зондированием аппаратурой РАЗ и автоматизированными датчиками 50-метровой метеомачты Одесского гидрометеорологического института. В это же время было проведено комплексирование макета двухчастотной системы РАЗ с акустическим локатором вертикального зондирования ИРЭ АИ СССР (для увеличения объема и качества получаемой метеорологической информации). С апреля 1988 года по октябрь 1990 года 20-см канал двухчастотной системы РАЗ использовался в исследованиях влияния бризовой циркуляции на вертикальное распределение коэффициента преломления для радиоволн в прибрежной зоне (температурно-ветровое зондирование). Для уверенной регистрации появления бризовой ячейки (ее верхней границы) высота зондирования системы РАЗ-4 оказалась недостаточной. С начала 1993 года по конец 1995 года в лаборатории был создан макет стационарной системы РАЗ-5, комплексированной с акустическим локатором и предназначенной для исследования процессов в пограничном слое атмосферы над лесостепью. Основные технические параметры: рабочая частота радиолокатора – 440 МГц, рабочая частота акустического локатора – 1 кГц, устройство управления и обработки данных зондирования – персональный компьютер АТ ХТ 286. В дальнейшем, до сентября 1999 года, проводилась экспериментальная отработка методик комплексного вертикального зондирования атмосферы с помощью этого комплекса. С 2000 года осуществлен переход от макетно-аппаратного моделирования систем РАЗ к математическому.

Проблемы и перспективы развития метода и аппаратуры РАЗ

Несмотря на почти 50-летнюю историю развития, метод РАЗ пока не занял своего достойного места в ряду эффективных способов метеонаблюдений, широко применяющихся на практике, несмотря на реальную возможность дистанционного и оперативного получения больших объемов количественной метеоинформации и высокой (для дистанционных средств) точностью. В работе [17] изложены основные способы радиоакустического зондирования, разработанные в ХНУРЭ для дистанционной регистрации вертикальных профилей основных метеовеличин: температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра в пограничном слое. В ходе реализации этих способов с помощью макетов аппаратуры РАЗ сотрудниками лаборатории накоплен огромный опыт, полученный при настройке, экспериментальном зондировании и при проведении комплексных работ по физике атмосферы и ее загрязнении. Тщательный анализ эффективности использования аппаратуры РАЗ в различных метеоусловиях и обстоятельствах позволил выделить ряд факторов (технических, атмосферных, социальных и пр.), ограничивающих возможности этого метода. Можно указать на

такие факторы, влияющие на эффективность радиоакустического зондирования и его внедрение в практику метеонаблюдений:

- фокусирование рассеянных сигналов в пятно конечных размеров (в отличие от поля рассеянных сигналов, возникающего при радиолокации точечных целей);
- смещение пятна по подстилающей поверхности вследствие переноса пакета звуковых волн горизонтальным ветром;
- поворот фазового фронта звуковых волн под действием градиентов температуры воздуха и скорости ветра;
- наличие в атмосфере вертикального градиента температуры воздуха, что приводит к нарушению установленного условия Брэгга:
- суточный и годовой ход метеовеличин;
- порывистость ветра и изменчивость его по направлению;
- поворот ветра с высотой;
- наличие вертикальной составляющей скорости ветра;
- молекулярное поглощение энергии звуковых волн;
- турбулентное рассеяние звуковых волн;
- разрушающее действие турбулентности атмосферы на зондирующий пакет (нарушение продольной и поперечной когерентности фазовых фронтов звуковых волн);
- наличие осадков различной интенсивности и агрегатного состояния;
- миграция рассеивающего объема атмосферы в пределах зондирующего пакета волн;
- неидентичность условий рассеяния от зондируемого слоя при двухчастотном зондировании:
- усреднение значений метеовеличин по объему зондирующего пакета (в отличие от традиционных для метеорологии точечных измерений);
- наличие «холостых» зондирований, особенно при порывистом ветре;
- отсутствие методологии использования метеорологической информации, поступающей с большой скоростью и в огромных количествах;
- сильная изменчивость зарегистрированных единичных профилей метеовеличин;
- недостаточная для некоторых приложений (например, для исследований микрофизических процессов в атмосфере) точность измерения метеовеличин, в частности, влажности воздуха;
- отсутствие научно обоснованной методики метрологической аттестации систем РАЗ;
- шумовое загрязнение в зоне размещения систем РАЗ.

Соотношение некоторых факторов по степени их влияния на эффективность зондирования при измерении метеовеличин методом РАЗ.

Влияние ветра на радиоакустическое зондирование. Многолетние наблюдения, выполненные в ходе экспериментальных работ по изучению возможностей метода и аппаратуры РАЗ, показали, что ветер оказывает сильное влияние на результаты измерений основных метеовеличин: температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра [17]. Для выделения действия ветра на эффективность вертикального РАЗ атмосферы были проведены эксперименты с помощью 20-см системы РАЗ [17]. В этих экспериментах акустический излучатель, состоящий из четырех модулей (4×4 электродинамических громкоговорителя каждый модуль), составленных вплотную, был преобразован в распределенный излучатель (см. рис. 1). В таком варианте акустического излучателя модули размещались вдоль направляющей фермы на расстоянии 0,5 – 1,0 м друг от друга в зависимости от скорости приземного ветра и задач эксперимента. В методике проведения эксперимента заложено предположение о том, что при малых расстояниях между модулями (по сравнению с высотой зондирования) условия распространения акустических зондирующих пакетов, излученных отдельными модулями одновременно, будут практически одинаковыми, а их горизонтальный перенос будет определяться значением горизонтального ветра. На рис. 2 представлен вид отраженных сигналов, полученных при одновременном использовании четырех модулей, разнесенных на

расстояние 0,5 м и запитанных одинаковой мощностью. Анализ вида полученных таким образом отраженных сигналов позволяет сделать ряд интересных выводов. Во-первых, при таком зондировании акустические пакеты, излученные отдельными модулями, горизонтальным ветром последовательно переносятся через сведенные диаграммы направленности антенн радиоканала, начиная с акустического пакета, излученного первым модулем. Во-вторых, поочередное прохождение пакетов дает группу отраженных импульсов со спадающей амплитудой. В-третьих, как видно из соотношения амплитуд первого и последнего импульсов, можно предположить, что главную роль в уменьшении амплитуды отраженного сигнала при РАЗ играет горизонтальный перенос пакета, а не нарушение условия Брэгга вследствие существования вертикального градиента температуры воздуха.

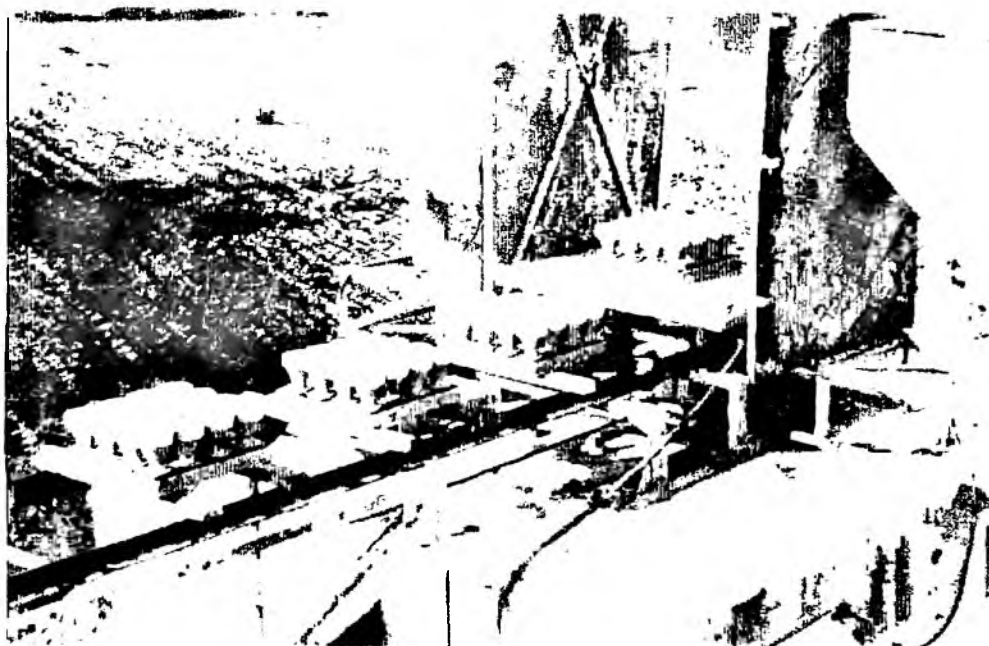


Рис. 1

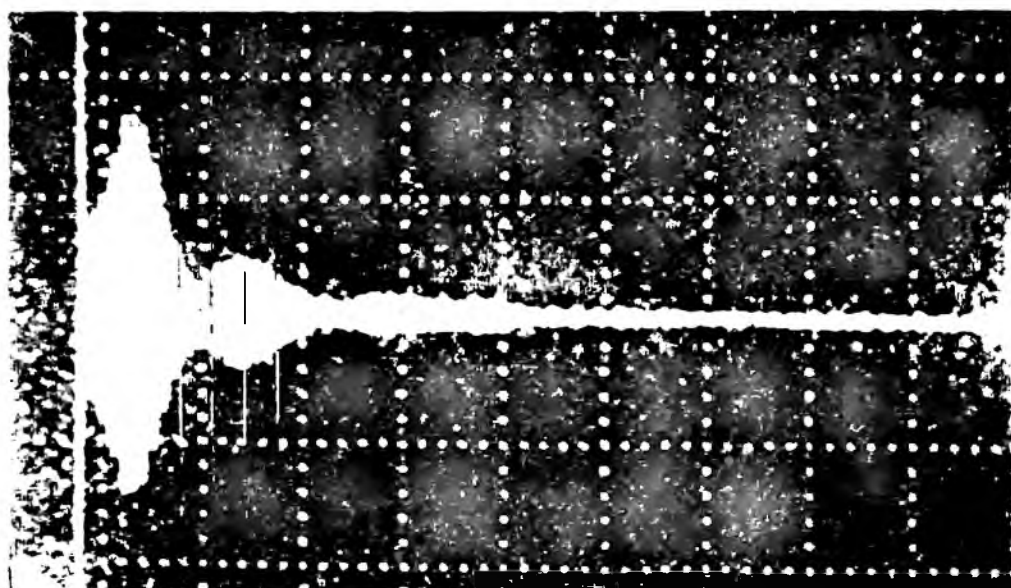


Рис. 2

В целом же по результатам эксперимента с распределенным излучателем можно отметить следующее. Высоту регистрации температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра вертикальным зондированием ограничивает, в большей степени,

горизонтальный ветер. Он же увеличивает погрешность определение влажности воздуха двухчастотным амплитудным РАЗ (по методу работы [17]), так как коэффициент молекулярного поглощения по данной методике рассчитывается по экспоненте заднего фронта одного отраженного импульса, а его следует рассчитывать по огибающей максимумов амплитуд всех импульсов. Кроме того, с помощью распределенного излучателя можно не только увеличить высоту вертикального зондирования и повысить точность определения влажности, но и одновременно измерять скорость и направление горизонтального ветра.

Молекулярное поглощение – турбулентное рассеяние В течение ряда лет в лаборатории зондирования атмосферы разрабатываются способы регистрации вертикальных профилей влажности воздуха. В основу одного из способов была положена известная зависимость поглощения звуковой энергии от частоты звука и расстояния. При этом полагалось, что используемое для расчета влажности отношение амплитуд отраженных сигналов, измеренных одновременно на двух разных (например, кратных) частотах, будет зависеть лишь от разности коэффициентов молекулярного поглощения звука; влияние же турбулентности на это отношение при таком подходе будет исключено. Поэтому в эксперименте ожидали появления двух огибающих амплитуд отраженных сигналов, задние фронты которых имели бы вид экспонент с различными показателями. Созданной для проверки возможностей данного способа аппаратурой РАЗ амплитудные измерения производились череспериодно (через 1 с): вначале на низкой частоте (3,4 кГц) частоте, затем на высокой (6,8 кГц). В условиях неподвижной атмосферы две последовательно зарегистрированные, а затем совмещенные во времени, огибающие амплитуд действительно оказывались подобными по форме, но с различными показателями экспонент. Однако по мере возникновения и развития турбулентности степень коррелированности между огибающими амплитуд заметно снижалась, а результаты расчета влажности становились некорректными. Для выяснения механизма влияния турбулентности на эффективность рассматриваемого способа были проведены дополнительные исследования. Теоретически установлено, что учет частотных зависимостей коэффициента турбулентного рассеяния звука и поперечного масштаба когерентности фазового фронта звуковой волны может обуславливать возникновение погрешности измерения до (20-40 %) относительной влажности. Снизить погрешность измерений можно путем коррекции данных амплитудных измерений на основе расчета коэффициента турбулентного рассеяния звука и поперечного масштаба когерентности по данным о значениях структурных постоянных пульсаций температуры и скорости ветра для конкретных условий зондирования. Допустимость череспериодного зондирования была проверена с помощью упомянутой выше аппаратуры РАЗ. В ходе эксперимента в атмосферу излучался акустический импульс с искаженным синусоидальным заполнением частотой 3,4 кГц. При этом предполагалось, что за счет такого искажения в объеме атмосферы, занимаемом акустическим пакетом, возникает ряд гармоник излученной частоты. Поддерживая условие Брэгга для первой и второй гармоник акустических колебаний в атмосфере, регистрировали одновременно обе огибающие амплитуд сигналов, отраженных от акустического пакета. Основным результатом эксперимента заключается в следующем: местоположение максимумов огибающих амплитуд на оси высот (при постоянной излучаемой частоте) весьма изменчиво; оба максимума амплитуды чаще всего не совпадают ни по высоте, ни по значению. Заметим, что эксперимент проводился в условиях умеренного порывистого ветра (скорость 5-7 м/с). В приложении к методу РАЗ максимальное значение огибающей амплитуды сигналов, отраженных от акустического пакета, распространяющегося по всей трассе зондирования, возникает в том случае, когда согласованы длины волн электромагнитного и акустического излучений. Такое согласование происходит при определенной температуре воздуха (точнее, при определенной скорости звука). И если в какой-то момент времени максимумы огибающих амплитуд сигналов, синхронно зарегистрированных на двух частотах, не совпадают по высоте, то это может означать, что температурные неоднородности двух масштабов (10 см и 5 см, соответствующие зондирующим частотам), формирующие два отраженных сигнала, и скорости их вертикального перемещения

неодинаково распределены в объеме атмосферы, занимаемом акустическим пакетом в данный момент времени. Следовательно, даже синхронное двухчастотное зондирование не обеспечивает одинакового влияния турбулентности атмосферы на амплитуды отраженных сигналов. Поэтому очень важным становится подход к выбору интервала метеонаблюдений аппаратурой РАЗ: он должен быть таким, чтобы реализации амплитуд, используемые для расчета влажности, были представительными.

Преимущества систем РАЗ по сравнению с другими дистанционными средствами получения количественной информации об основных метеовеличинах:

- экологическая чистота (малые уровни электромагнитных излучений);
- малое энергопотребление;
- способность систем РАЗ измерять одновременно несколько метеовеличин (температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра);
- достаточная для большинства приложений точность дистанционной регистрации вертикальных профилей метеовеличин;
- возможность высокой степени автоматизации процесса измерения и дистанционного управления;
- возможность создания мобильных систем для локального или регионального мониторинга атмосферы.

Возможные пути повышения эффективности метода и аппаратуры РАЗ:

- создание оптимальной структуры аппаратуры систем РАЗ и обеспечение ее технических и тактических параметров, наиболее подходящих для организации систематических наблюдений за основными метеовеличинами в пограничном слое;
- построение антенного поля приемных антенн;
- автоматизация сохранения условия Брэгга при распространении пакета звуковых волн по всей трассе зондирования (применением вероятностных методов при выборе вида зондирующих звуковых сигналов на основе априорной информации или быстродействующей подстройки высокостабильного радиопередатчика);
- стабилизация уровней принимаемых сигналов при доплеровских способах обработки данных зондирования;
- продолжение разработок по созданию эффективного способа измерения влажности атмосферного воздуха;
- выбор времени усреднения поступающей информации за стандартные для метеорологии отрезки;
- комплексирование с другими дистанционными средствами, например с содарами, ветровыми профилерами и пр. (или для повышения точности метеоизмерений, или для расширения функциональных возможностей).

Список литературы: 1. *Каллистратова М. А., Кон А. И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 196 с. 2. *Бабкин С. И., Проихин Е. Г., Ульянов Ю. Н.* Дистанционная регистрация температурных профилей в условиях умеренных и сильных ветров. 2-й Всесоюз. сим. «Технические средства для государственной системы наблюдений и контроля среды (ГСКП)». Тез. докл., ч. II. Обнинск, 1983. С. 187-189. 3. *P. Trivero, A. Masorati, P. Maracchi, G. Bonno.* Improvements of a Dometric RASS // Proc. of ISARS'98.-Vienna, Austria, 1998. P.196-199. 4. *Y. Akai, T. Kanzuki.* The Application of a Mobile RASS to Observation of an Urban Heat Island // Proc. Of ISARS'98. Vienna, Austria. 1998. P.200-203. 5. *Vogt S.* Advantes in RASS since 1990 and practical application of RASS to air pollution and the ABL studies // Proc. of ISARS'96. Moscow, 1996. P. G.37 – G.50. 6. *Карташов В.М.* Особенности обработки радиосигнала, рассеянного акустическим волновым пакетом // Радиотехника.1998. №105. С.75-79. 7. *Кон А.И., Налбандян О. Г.* Радиоакустическое зондирование атмосферы непрерывным звуковым излучением // Изв. АН СССР. Физика тмосферы и океана. 1981. Т.17. №8. С.824-836. 8. *Гурвич А. С., Кон А. И., Налбандян О. Г. и др.* Методы радиоакустического зондирования атмосферы. Препр. ИФА АН СССР. М.: Наука,1976. 43 с. 9. *Азизян Г. В.* О частотном спектре рассеянного сигнала в системах радиоакустиче-

ского зондирования атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981 Т.17, №8. С.883-886. 10. *Петров А. В., Яковлев А.А.* Анализ и синтез радиотехнических комплексов. М.: Радио и связь, 1984. 246 с. 11. Wind profiler assessment report. NOAA, Silver Spring, Maryland. 1994. 141 p. 12. *Smith P.L.* Remote measurements of wind velocity by the electromagnetic-acoustic probe. 1. System analysis. // Conf. proc. 5 th Annu. convention on military electronics. Wash (D.C.), 1961, rep № 419. P.43-53. 13. *Fetter R.V.* II. Experimental system // Там же. P. 54-59. 14. *Atlas D.* Indirect probing techniques. Bull.Amer.Meteorol.Soc.,vol.43, № 9, p. 457-466. 15. *Marshall I.M.* A radio acoustic Sounding System for the remote measurements of atmosphere parameters, Sci.Rep. #39.SU-SEL-72-003, Stanford Electronics Laboratories.1972. P.152. 16. *А. В. Зелинский, Е. Г. Прошкин, Ю. Л. Пуштенко.* О применении метода многократного гетеродинирования в доплеровских системах прецизионного измерения скорости // Материалы юбилейной науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава Харьковского института радиоэлектроники, посвященной 50-летию Великого Октября. Харьков, ХИРЭ, 1968. С.31 – 34. 17. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под ред. *Кашени Б.Л., Прошкина Е.Г., Лагутина М.Ф.* Раздел 2. Радиоакустическое зондирование пограничного слоя атмосферы. С.44-98. Харьков: Коллегиум, 2002. 429 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 10.11.2006