

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Станции радиоакустического зондирования (расдары), позволяющие определять температуру и скорость ветра, являются информативным и перспективным средством исследования атмосферы.

В первых системах радиоакустического зондирования (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 первой системы ЕМАС [1], созданной в 1961 г., составляла $\lambda_e = 3$ см, длина акустической волны – $\lambda_s = 1,5$ см, а максимальная дальность действия – 30 м. Полученная дальность разочаровала исследователей и следовательно разработка появилась только в 1972 г. Установка называлась RASS и имела следующие параметры [1]: $\lambda_e = 8,15$ м; $\lambda_s = 4,075$ 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 установок РАЗ применялись импульсное акустическое излучение и непрерывное монохроматическое радиоизлучение, использовались отдельные, разнесенные на некоторое расстояние, приемная и передающая радиоантенны. Передающая акустическая антенна, как правило, располагается посередине между радиоантеннами. Такая схема расположения антенн в совокупности с указанной комбинацией зондирующих радио и акустического сигналов (схема построения системы) получила название «основной».

К середине 80-х годов, когда сформировались принцип построения и структура доплеровской радиоакустической системы, в мире насчитывалось около 10 работающих установок РАЗ, большинство из которых были построены по основной схеме [1].

Отличия известных установок состояли, в основном, в используемых диапазонах длин волн, мощностях излучения и числах длин волн в акустическом импульсе. Заметим, что число длин волн в акустическом импульсе (длительность акустической посылки) легко может быть изменено и не является в этом смысле существенной характеристикой.

Все имевшиеся к тому времени системы (кроме ЕМАС и 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-10, разработанная в Харьковском институте радиоэлектроники (ныне ХНУРЭ) [2]. Здесь радио и акустическая антенны размещаются так же, как и обычно 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 сноса звукового пакета. Работоспособность установки при смещенной акустической антенне обеспечивается путем вращения платформы до появления в приемнике отраженного радиосигнала. Затем акустическую антенну смещают на большую величину и добиваются получения отраженного сигнала из следующей точки профиля. Это позволяет несколько увеличить дальность действия установки и производить грубую оценку скорости и направления горизонтального ветра в исследуемом слое атмосферы.

Разработанные в последние годы радиоакустические системы (РАС) [3,4,5] не имеют принципиальных отличий, только в силу возросшей производительности компьютеров в них реализуются дополнительные возможности по обработке и отображению результатов. Например, постоянно работающая установка РАЗ канадского университета McGill содержит архивную базу данных (сбор которых осуществляется, начиная с мая 1997 г.) для статистического анализа, а полученные с использованием расдара текущие температурные профили, как и полученные ранее данные, доступны в Интернет по адресу: www.mcgill.ca.

Если ранее (в 70-е – 80-е годы) большинство использовавшихся содаров и расдаров разрабатывались группами экспериментаторов и изготавливались в единичных экземплярах, то позднее (наряду с единичными, уникальными разработками) был начат также мелкосерийный выпуск подобных станций (вначале содаров, а затем расдаров).

Разработчиками акустических и радиоакустических систем зондирования, предназначенных для промышленного производства, являются, как правило, те же научные коллективы, которые изготавливают экспериментальные установки «для себя».

Заметим, что для большинства коммерческих акустических систем существуют (предлагаются) также комплекты аппаратуры расширения до РАС, т. е. с использованием данных комплектов на основе акустических локаторов могут быть построены системы РАЗ.

Радиоканал РАС реализуется по схеме «истиной 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 (число длин волн N в импульсе), тем меньше этот диапазон [1].

Настройка на условие Брэгга для каждой из точек профиля («площадок») вручную путем изменения частоты излучаемого звукового сигнала занимает достаточно много времени, которое в зависимости от количества «площадок» может составлять 0,5 – 3 часа [1].

Используемый алгоритм измерений значительно ограничивает оперативность получения профилей метеопараметров – качество, являющееся одним из основных достоинств метода. 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», с подстройкой частоты акустического излучения в среднем по трассе [1], однако достаточный для регистрации уровень сигнала даже при благоприятных метеоусловиях удается получить только из нескольких соседних точек профиля. Нарушение при этом условия Брэгга в крайних точках, в которых удается зарегистрировать сигнал, приводит к появлению ошибок в определении температуры порядка 0,5 – 1° С [1]. Указанная ошибка не превышает случайных ошибок радиозондов, но оказывается коррелированной с градиентом скорости звука, причем, градиент всегда занижается по абсолютной величине. И хотя общее время измерения температурного профиля по такой методике значительно уменьшается, однако появляется неслучайная ошибка, которая не может быть уменьшена осреднением и коррекцией результатов измерений.

Кардинальным решением вопроса о повышении оперативности радиоакустического зондирования и точности измерения метеопараметров является подстройка частоты электромагнитного излучения под условие Брэгга по мере продвижения простого акустического импульса в атмосфере. Разработке таких методов 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 (в том числе сезонные и суточные) изменения метеопараметров целесообразно компенсировать подстройкой частоты звукового генератора. Такая периодическая подстройка частоты звука может быть выполнена по прямым измерениям температуры и скорости ветра у поверхности земли и может осуществляться автоматически либо оператором. Компенсацию быстрых изменений длины акустической волны (в течение времени распространения акустического пакета) необходимо производить изменением частоты радиоизлучения. Так, чтобы обеспечить выполнение условия Брэгга при изменении температуры атмосферы с высотой на 10° С, необходимо иметь возможность перестройки частоты радиосигнала в пределах 1,5 % с точностью порядка 0,05 % и скоростью порядка 0,1 % за 0,1 с [1].

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 значительных размеров. 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 переключаются [6].

Разработаны соответствующие алгоритмы обработки сигналов для такой схемы [6], позволяющие, в частности, оценивать координаты центра пятна рассеянных колебаний, перемещающегося в процессе измерений по апертуре решетки.

Отметим, что все вопросы системного, технического характера, возникающие при разработке радиоакустических систем, решались до сих пор инженерным, экспериментальным путем. После прихода к «основной» схеме построения РАС усилия разработчиков были направлены на совершенствование различных элементов структуры. Рассматривались возможности использования различных видов радиоантенн, 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 [7,8,9], посвященных исследованию свойств некоторых типов зондирующих сигналов, появились позднее. Полученные в них результаты подтвердили правильность инженерной интуиции, подкававшей использование указанной 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 делающий 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 [1].

Аппаратурные задачи имеют небольшой удельный вес среди публикаций, посвященных вопросам зондирования атмосферы с использованием звуковых волн, и вес этот постоянно уменьшается [1,5]. Если до 1983 г. 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 профилерам и комбинированным системам). Остальные сообщения посвящены различным геофизическим вопросам.

В докладах ведущих ученых неоднократно высказывалось мнение, что разработка вопросов построения акустических и радиоакустических систем зондирования атмосферы практически завершена и происходит поворот к практическому их использованию [5].

Таким образом, в области разработки систем радиоакустического зондирования атмосферы сложилась ситуация, когда основными методами проектирования являются инженерная интуиция, основанная на опыте аналогичных и подобных решений в других областях, и эксперимент. Работы по созданию теории радиоакустических систем по существу не производились, задачи синтеза и оптимизации систем, устройств, сигналов не ставились.

Имеющееся положение обусловлено, видимо, тем, что ведущие позиции и научный авторитет в данном направлении (в вопросах зондирования атмосферы) принадлежит физикам-метеорологам 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., Peters G. и др. Подавляющее большинство известных установок радиоакустического зондирования созданы под идейным руководством специалистов данного направления. Вопросы, связанные с проектированием аппаратуры, при этом решались в основном путем заимствования известных решений из радиолокации с учетом имеющихся особенностей радиоакустического зондирования.

Доминирующая точка зрения на РАС заложена еще основателями метода, которые предложили его сразу как практический и сформировали соответствующее к нему отношение. Первые неудачи, приведшие к «замораживанию» метода на десять лет, и последующие сложности в его освоении заставили более тщательно анализировать радиофизическую сторону метода: распространение акустической и электромагнитной волн в атмосфере и взаимодействие их между собой.

Однако отношение к аппаратуре осталось прежним на многие годы, «потребительским». Считается, что РАС – инструмент для измерений, область, на которую практически полностью переносятся представления классической радиолокации, «железо», которым должны заниматься инженеры. Как объект для исследования РАС не рассматривались.

Таким образом, можно сказать, что теория систем РАЗ существует настолько, насколько справедливы известные радиолокационные воззрения по отношению к этим системам.

Используемый подход в значительной степени предопределил достигнутые к настоящему времени успехи в развитии метода и систем РАЗ, однако он же и замедлил последующее развитие на-

правления, поскольку далеко не все вопросы системного, технического характера в данной области можно эффективно решить таким путем в силу специфики РАЗ. Либо применяемые решения могут оказаться очень далекими от оптимальных.

Специфические особенности систем радиоакустического зондирования атмосферы обусловлены прежде всего особенностями использования в качестве радиолокационной цели такого необычного объекта как акустический волновой пакет. Данная цель является «частично прозрачным» для радиоволн частотно-зависимым объектом, имеющим когерентный характер распределения неоднородностей показателя преломления ϑ в продольном и поперечном направлениях, зависимости ϑ от продольной и поперечной координат могут быть адаптивным образом изменены при излучении. Объект также сравнительно легко поддается воздействию атмосферных процессов и под их влиянием существенно изменяет свое местоположение, параметры движения и внутреннюю структуру.

Особенности объекта накладывают достаточно жесткие ограничения на структуру и параметры излучаемой радиоволны, с одной стороны, и порождают специфические свойства рассеянного радиосигнала, с другой: сигнал содержит когерентную и некогерентную составляющие; фокусируется определенным образом в пятно на поверхности земли и т. д.

При таком рассмотрении становятся очевидными требования, формируемые используемым рассеивающим объектом к радиопередающей и радиоприемным частям системы и подчеркиваются существующие системообразующие связи, что выделяет РАС в специфический класс локационных систем.

Естественно, что для создания эффективных радиоакустических систем необходима глубокая теоретическая разработка соответствующих вопросов аппаратного характера с использованием адекватных подходов, поскольку многие вопросы данного направления не содержатся в теории радиолокационных систем.

Теоретическое изучение и исследование свойств радиоакустических систем, а также синтез и разработка технических решений должны носить комплексный системный характер, учитывающий взаимное влияние различных подсистем, и выполняться с использованием соответствующих подходов и адекватного математического аппарата, применяющихся в теории систем, теории стохастического оптимального управления, теории сигналов и др.

В литературе сформировалось четкое мнение [10], что разработка современных эффективных радиосистем, решающих сложные информационно-измерительные задачи и работающих в условиях разнообразной помеховой обстановки, возможна лишь на базе современных методов оптимизации. Причем, системы определенного, пусть достаточно узкого класса, имеющие характерные особенности, должны иметь собственную, адаптированную к имеющейся специфике теорию, «обслуживающую» данное направление.

Значительные успехи достигнуты в последнее время 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 очень слабые сигналы, полученные от распределенных в пространстве турбулентных неоднородностей. Естественно, что являясь сложным стационарным (и дорогостоящим) сооружением РВП способен принимать также 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 (доработки) учитывать появляющиеся системообразующие связи.

Поскольку РВП представляют собой РЛС с высоким энергетическим потенциалом, предназначенные для работы по объемно-распределенным целям с очень малым значением 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 этом случае 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 также и в ряде установок РАЗ с «обычным», более низким энергетическим потенциалом радиоканала.

Например, изготовленные корпорацией «RADIAN» профилеры, комбинированные с системами РАЗ, RWP50-RASS и RWP915-RASS работают соответственно на частотах 50 МГц и 915 МГц. RWP50-RASS позволяет определять профили ветра на высотах от 2 до 12 км и температурные профили в диапазоне 2 – 4 км, а RWP915-RASS – эти же метеопараметры соответственно в диапазонах 1

– 5 км и 1 –1,5 км. При измерениях значения скорости ветра осредняются в течение 50 минут, а профили температуры – в течение 10 минут.

Радиоантенна комбинированной системы, работающей на частоте 50 МГц, состоит из большого числа антенных элементов, расположенных на высоте 1,5 м над поверхностью земли и распределенных по площади 70×70 м. Три акустических источника расположены в углах квадратной электромагнитной антенны. Таким образом, схема построения систем РАЗ, комбинированных с профилерами, является разновидностью основной схемы, в которой передающая и приемная радиоантенны объединены в одну – приемно-передающую антенну, а излучаемый электромагнитный сигнал является импульсным [12].

Значительные информационные возможности обеспечивает использование сетей РВП, что подтверждается результатами работы Демонстрационной сети профилеров – NOAA Profiler Network (NPN) [12]. NPN включает 32 РВП (8 станций представляют собой комбинированные системы профилер-РАЗ), работающих в диапазоне 400 МГц и развернутых на территории 17 штатов США. Сеть, созданная с исследовательскими и коммерческими целями, имеет большое число потребителей информации: отделения Национальной службы погоды; 135 университетов; частный сектор экономики. Полученные данные доступны также в Интернет по адресу: www.dd.fsl.noaa.gov.

Таким образом, из приведенного анализа следует, что для создания эффективных радиоакустических систем необходимо глубокое теоретическое исследование соответствующих вопросов аппаратного характера с использованием адекватных подходов и математического аппарата, применяемых в теории систем, теории сигналов и т. д.

Вначале целесообразно рассмотреть проблемные вопросы, связанные с разработкой методов анализа используемых целей, построением основ теории и применения зондирующих акустических и электромагнитных сигналов. Результаты такого исследования необходимы для последующего выбора видов зондирующих колебаний, синтеза и анализа алгоритмов и устройств обработки сигналов, разработки алгоритмов интерпретации данных.

Список литературы: 1. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 200 с. 2. *Бабкин С.И., Куценко В.И., Пахомов Ю.А.* и др. Система радиоакустического зондирования атмосферы сантиметрового диапазона волн // 5 Всесоюз. симпоз. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тез. докл., ч. 3. Томск: ТФСО АН СССР, 1978. С. 143-146. 3. *P. Trivero, A. Mazarati, P. Marcacci, G. Bonino* Improvements of a Decimetric RASS // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 196-199. 4. *Y. Akai, T. Kanzaki* 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.* Advances 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, Харьков. 1998. №105. С. 75-79. 7. *Кон А.И., Налбандян О.Г.* Радиоакустическое зондирование атмосферы непрерывным звуковым излучением // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14, №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. 1976. 43 с. 9. *Азизян Г.В.* О частотном спектре рассеянного сигнала в системах радиоакустического 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. *R.B. Chadwick and M.H. Ackley* The NOAA Profiler Network: Experiences and Plans // Extended abstracts of PWS-97. COST 76. Engelberg, Germany, 1997. P.51-59.

Харьковский национальный университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 24.09.2001