

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Станции акустического зондирования (сонары) являются информативным и перспективным средством исследования атмосферы. Получаемые с использованием сонаров данные широко используются при исследовании различных аспектов распространения и рассеяния радио- и световых волн в тропосфере, оказывающих существенное влияние на работу систем связи.

Классическая структура акустического лоатора (АЛ) включает передатчик, приемник, антенну, антенный переключатель и устройство регистрации. Соответствующий лоатор является моностатическим, излучение осуществляется, как правило, в вертикальном направлении, измеряются структурная постоянная флуктуаций температуры c_T^2 и радиальная скорость ветра.

Такая структура была исторически первой, долгое время оставалась наиболее распространенной, не утратила она значения и сейчас.

Наиболее часто в качестве регистрирующего устройства использовался факсимильный аппарат, позволяющий воспроизводить мощность рассеянного сигнала, определяющую интенсивность температурных флуктуаций в зависимости от высоты и от времени [1]. Это позволяет визуализировать структуру поля температурных неоднородностей и качественно оценивать состояние атмосферы, а используя разработанные методики интерпретации факсимильных записей, определять высоту температурной инверсии, верхнюю границу радиационного тумана, параметры кучевых облаков в нижнем слое атмосферы и др.

В современных условиях подобные системы для обработки и отображения информации оснащаются компьютером и дисплеем.

Системы, имеющие рассматриваемую структуру, доказали информативность и перспективность применения метода акустического зондирования при решении различных задач и послужили основой для усовершенствования и развития акустических лоаторов.

Следующим шагом явилось создание систем, определяющих профиль полного вектора скорости ветра по методике зондирования в трех направлениях. Излучение в различных направлениях может осуществляться последовательно путем принятия диаграммой направленности (антенной) различных положений. Структура системы в этом случае остается прежней, либо используется трехканальная система, содержащая три антенны, ориентированные соответствующим образом в пространстве. Все три канала выполняются идентичными и строятся по рассмотренной схеме.

Известны различные варианты конструктивного исполнения станций, которые могут быть стационарными, возимыми, переносными (портативными) [1]. В [2] описана стационарная установка, работающая на частоте 850 Гц, в которой используется параболическая антенна с диаметром 16 м, изготовленная из железобетона. Один из лучших образцов техники конца 80-х начала 90-х годов – возимый трехканальный лоатор МАЛ-2 [1].

Фирма «МТЕК» (Германия) выпускает моностатический АЛ MODOS [3], три антенны которого ориентированы в различных направлениях. Каждая из антенн содержит по 7 громкоговорителей с экспоненциальными рупорами. Диапазон исследуемых высот станции – 30–400 м, диапазон частот – 1500–3000 Гц, мощность (электрическая) передатчика – 1 кВт. Сонары аналогичных конфигураций выпускаются также фирмами «SENSITRON» (Испания), «KAIYO Corp.» (Япония) [4,5] и др.

Многопозиционный акустический лоатор ИВА-2 [6], адаптированный для применения в условиях аэропорта, разработан в ХИРЭ (ныне ХНУРЭ). Лоатор построен по бистатической схеме, имеет одну передающую и девять приемных антенн, сгруппированных по три на каждую из трех высот зондирования. Для повышения энергетического потенциала системы в целях борьбы с помехами используется непрерывный зондирующий сигнал.

Отметим, что характеристики акустической системы в целом существенно зависят от параметров используемой антенны, поскольку техника обработки сигналов (при используемых в АЛ звуковых частотах) удовлетворяет предъявляемым требованиям в значительно большей степени, чем антенна, почти идеально, как указано в [1]. Например, уровень внешних шумов, поступающих на вход приемника по боковым лепесткам диаграммы направленности, даже в наименее зашумленных местах на несколько порядков превышает уровень собственного шума приемного устройства [1].

В соответствии с этим вопросам разработки акустических антенн и уменьшению уровня их бо-

ковых лепестков в литературе уделяется очень много внимания. Основной метод повышения пространственной избирательности систем – создание вокруг антенн звукозащитных бленд определенных форм, размеров и свойств (в виде цилиндра или конуса с использованием различных материалов путем помещения антенны в яму и т.п.).

Дальнейшим шагом в развитии содаров является использование в них ФАР, для построения которых вначале применялись только электродинамические преобразователи. Например, фирма «МЕТЕК» производит содар DSDPA.90 с ФАР в виде 8×8 рупорных громкоговорителей [7]. Луч антенны может путем электрического качания занимать пять различных положений. Основные параметры системы – диапазоны дальностей, излучаемых частот, точностные показатели практически полностью повторяют характеристики локатора MODOS этой же фирмы.

Последующая разработка эффективных пьезоэлектрических элементов для фазированных антенных решеток содаров ведущими фирмами-производителями электронных компонентов значительно расширила возможности разработчиков аппаратуры. При этом создается ситуация, когда часть функций, выполнявшихся ранее механическими, по существу, устройствами – антеннами (например, сканирование диаграммы направленности, защита от помех путем пространственной избирательности) может быть «передана» для реализации с помощью электронной техники обработки сигналов, обладающей, как отмечалось, значительно большими информационными возможностями.

АФАР в совокупности с высокопроизводительными компьютерами и цифровой техникой для обработки сигналов образуют мощный набор технических средств, выступающих в качестве предпосылок, «рычагов» для существенного улучшения функциональных возможностей содаров. Открываются возможности для реализации различных оптимальных алгоритмов обработки сигналов (в том числе алгоритмов пространственно-оптимальной обработки), алгоритмов адаптации и управления, вторичной обработки, интерпретации данных зондирования и т.д.

Подобные процессы несколько ранее начались в радиолокации [8], в акустическом зондировании они долгое время сдерживались отсутствием эффективных акустоэлектрических элементов, необходимых для построения АФАР.

Приведем в таблице основные технические характеристики дискретных антенн в виде ФАР, используемых в содарах фирмы «REMTECH» [9].

Таблица

Тип антенны	РА1	РА2	РА1-LR
Число антенных элементов	52	196	52
Тип элементов	Motorola 1025	Motorola 1025	Philips 3480/10
Номинальная центральная частота, Гц	2100	2100	2100
Размеры антенны, м	0,65×0,65	1,3×1,3	1,4×1,4
Вес антенны, кг	25	100	120
Акустическая мощность, Вт	1	10	30
Максимальная высота зондирования, м	1000	1500	3500
Средняя высота в нормальных условиях, м	550	1000	2500

С использованием дискретной антенны РА-1 фирма «REMTECH» производит портативные содары, вес которых составляет 50 кг. Применяя антенну РА-1-LR – тропосферный профилиер, работающий в благоприятных условиях до высоты 3500 м.

Акустические локаторы с плоской ФАР выпускает также фирма «SCINTEC» (США) [10]. Содары FAS64, XFAS52 обеспечивают измерение трехмерных профилей скорости ветра и структуры турбулентности в диапазоне высот от 15 до 1000 м с высоким пространственным разрешением. Алгоритм управления ФАР позволяет излучать и принимать сигналы в девяти различных направлениях, причем, одновременно может осуществляться излучение в двух противоположных направлениях (одно, как правило, по ветру, другое против).

Адаптивное изменение длительности зондирующих импульсов в зависимости от высоты позволяет существенно улучшить пространственное разрешение на небольших высотах.

В модели FAS64-SH реализован алгоритм управления амплитудами элементарных сигналов решетки (SH - режим), позволяющий уменьшить излучение по боковым лепесткам диаграммы направленности. Эту модель, обеспечивающую существенное уменьшение шумового загрязнения прилегающих районов, называют "шепчущим" содаром.

Отмечается хорошее согласование по акустическому сопротивлению элементов решетки с атмосферой, защищенность их от осадков, наличие индивидуальных усилителей мощности для излучения и сверхмаломощных предварительных усилителей для приема расположенных вблизи преобразователей, что снижает восприимчивость к электромагнитным помехам.

Бесспорный лидер производства техники акустического зондирования 70-х и 80-х годов фирма "AeroVironment" также разработала несколько моделей АЛ с использованием ФАР (AV-3000, AV-4000), относящихся к третьему и четвертому поколениям содаров [11]. Предусматривается возможность установки локаторов на различные платформы: корабли, грузовики, здания, а также возможность питания их энергией от аккумуляторных батарей.

Системы, предназначенные для детального исследования АПС, характеризующегося значительной изменчивостью метеопараметров, обладающие высокой пространственной разрешающей способностью за счет использования рабочих частот порядка 5 КГц, часто выделяют в класс мини-содаров. К ним относятся: ВОКУ мини-содар [12], имеющий четырехлучевую антенную систему, построенную по бистатической схеме; серийный содар AV 4000 с 3Э-элементной ФАР [11]; АЛ ИВА-2.

Стоимость рассмотренных содаров лежит в диапазоне 30–50 тыс. долларов и зависит от конфигурации и рабочей частоты.

Практически все современные системы дистанционного зондирования атмосферы (в том числе и акустические системы) содержат в своем составе персональный компьютер, который выполняет функции обработки информации, управления, отображения, накопления (архивации) полученных результатов и передачи их потребителям.

При наличии компьютера упрощается процесс и повышается эффективность управления станцией. Изменение ориентации антенн, длительности зондирующего импульса и мощности излучения может осуществляется непосредственно с клавиатуры. Результаты зондирования могут храниться в памяти в течение длительного времени (например, в течение нескольких лет), а недостающие сведения (например, о не измеряемых станцией метеопараметрах) имеется возможность оперативно получать по сети.

Использование различных оболочек, сред и программных продуктов, обладающих большими возможностями по обработке и отображению данных (в виде временных рядов, векторных графиков, контурных зависимостей, трехмерных зависимостей в координатах пространство-время и др.) существенно повышают показатели системы в целом, обеспечивая гибкость, возможности разностороннего анализа результатов, адаптации (к изменяющейся обстановке) и интеллектуализации.

Почти для всех рассмотренных содаров (содаров фирм "REMTECH", "SCIENTEC", "METEC") имеются комплекты аппаратуры расширения до радиоакустических систем, т. е. на их основе могут быть построены системы радиоакустического зондирования. Имеющиеся акустическая антенна и устройство обработки акустического сигнала дополняются в этом случае передающей и приемной радиоантеннами, радиопередатчиком и высокочастотным устройством для приема рассеянного радиосигнала. Значение частоты колебаний на выходе последнего примерно совпадает с частотой акустического сигнала, что позволяет использовать имеющееся в содаре низкочастотное устройство обработки для фильтрации и оценивания доплеровского сдвига электромагнитных колебаний. Все эти радиоакустические системы реализуются по основной схеме.

Одним из основных технических параметров акустического локатора, определяющим в значительной степени его технические характеристики, является несущая частота. С увеличением частоты наблюдается повышение направленных свойств и пространственного разрешения системы при заданных размерах антенны, увеличивается удельное сечение рассеяния и снижается уровень внешних помех, но, с другой стороны, существенно возрастает затухание акустической волны на трассе зондирования. Выбор длины волны осуществляют с учетом указанных противоречивых тенденций интуитивно, либо на основе формализованных процедур, используя известные модели усредненной спектральной плотности помех, процесса поглощения и т. д.

В настоящее время в АЛ используют звуковые частоты диапазона 1-5 КГц. При уменьшении частоты дальность зондирования, как правило, возрастает, но увеличиваются и габариты системы.

В большинстве рассмотренных АЛ используются простые импульсные сигналы. В литературе анализируется также возможность использования сложных зондирующих акустических сигналов [13], однако вопрос этот недостаточно проработан теоретически, детальная проверка в реальных атмосферных условиях не производилась.

Таким образом, проблема обеспечения необходимой помехозащищенности акустических локаторов не теряет со временем остроты, несмотря на разработку достаточно большого числа соответ-

вующих мер, устройств, алгоритмов обработки сигналов [14]. Распространенным недостатком последних является изменение при «устранении» помехи вида и параметров рассеянного сигнала, что существенно «загрубляет» информативность системы и препятствует тонкому изучению наблюдаемых атмосферных процессов и явлений.

В соответствии с этим встает задача разработки более совершенных алгоритмов защиты от помех, обеспечивающих более «чистую» фильтрацию, либо предотвращающих попадание помех на вход приемника. В литературе высказывается мнение о необходимости использования «радиолокационных» методов обработки сигналов в содарах.

Значительные возможности по совершенствованию содаров открываются в связи с разработкой и применением в АЛ акустических фазированных антенных решеток, позволяющих реализовывать алгоритмы адаптивной пространственной избирательности, т.е. адаптивное формирование в направлениях на источники помех нулей диаграмм направленности. Практическая реализация открывающихся возможностей позволит повысить эффективность использования содаров при решении задач, связанных с исследованием и прогнозированием условий работы систем радиосвязи в тропосфере.

Список литературы: 1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 166 с. 2. *Fukushima M., Akita K., Tanaka H.* Sodar probing of small scale temperature structure in the clear troposphere // J. Radio Res. Lab. 1975. V. 22. P. 23-43. 3. *Mobile Acoustic Windprofiler Doppler Sodar MODOS* // METEK, Meteorologische Messtechnik GmbH. Hamburg, Germane. 1996. 1 p. 4. *Sodar Sensitron SR100* / Sensitron. Madrid, Spain, 1998. 4 p. 5. *Remote Sensing Equipment for Wind and Turbulence Doppler Sodar: Model AR; Model KPA* / Kaijo Corporation. Tokyo, Japan, 1996. 1 p. 6. *Алехин В.И.* Исследования пограничного слоя атмосферы методом акустического зондирования // Радиотехника. 1998. №106. С.6-14. 7. *The acoustic windprofiler Doppler Sodar DSDPA.90* // METEK, Meteorologische Messtechnik GmbH. Hamburg, Germane. 1998. 4 p. 8. *Теоретические основы радиолокации* / Под ред. В.Е.Дулевича. М.: Сов. радио, 1978. 608 с. 9. *The RASS – system for remote sensing of temperature* / REMTECH. Velizy, France. S. a.. 1994. 4 p. 10. *Scintec sensors and systems. A new class of sodar. FAS64, FAS64-SH: High performance boundary layer profiler for wind speed and turbulence* / Scintec, Atmosphären-messtechnik AG. Germany. S. a. 4 p. 11. *AV Sodar system, Minisodar* / AeroVironment Inc. California, USA. S. a. 4 p. 12. *Mursh-Radlgruber E., Rengarajan G.* Aspects of high frequency acoustic sounding - examples from applications of the BOKU-minisodar // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 103-106. 13. *Bradley S S.* Use of coded waveforms for sodar systems // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 67-70. 14. *Корецкий Э.А.* Повышение помехозащищенности систем дистанционного зондирования атмосферы: Дис. ... канд. техн. наук. Харьков: ХГТУРЭ, 1999. 214 с.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 02.10.2001