

В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, С.И. БАБКИН, канд. техн. наук, Е.Г. ТОЛСТЫХ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

В зависимости от содержания задач для метеорологического обеспечения которых привлекается радиоакустическое зондирование (РАЗ) атмосферы, техническое решение структуры систем РАЗ оказывается разным, особенно их антенных устройств [1 – 3].

Наклонное температурно-ветровое зондирование атмосферы в нескольких направлениях (от одного до четырех) является неоперативным, требует высокой развязки передающего и приемного радиотрактов, точность измерения метеовеличин сильно зависит от скорости и направления ветра в зондируемом слое. Применение антенного поля приемных антенн значительно удорожает стоимость получаемой метеоинформации. Использование пассивной радиолокации пятна рассеянных радиосигналов требует применения высотных сооружений (мачты), что не всегда приемлемо.

Новым решением в этом ряду является применение распределенного акустического излучателя, призванного максимально исключить влияние горизонтального ветра на высоту зондирования и характеристики точности измерения основных метеорологических величин методом вертикального РАЗ [4].

Данная работа посвящена экспериментальной оценке эффективности использования распределенного акустического излучателя в системе РАЗ при измерении метеорологических величин.

Методика зондирования атмосферы системой РАЗ с распределенным акустическим излучателем

Для оценки эффективности вертикального РАЗ атмосферы с таким излучателем были проведены эксперименты с помощью 20-сантиметровой системы РАЗ [5]. В этих экспериментах акустический излучатель, состоящий из четырех модулей (4×4 электродинамических громкоговорителя в каждом модуле), составленных вплотную, был преобразован в распределенный излучатель [4]. 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 зондирования с распределенным акустическим излучателем 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 скорости горизонтального ветра.

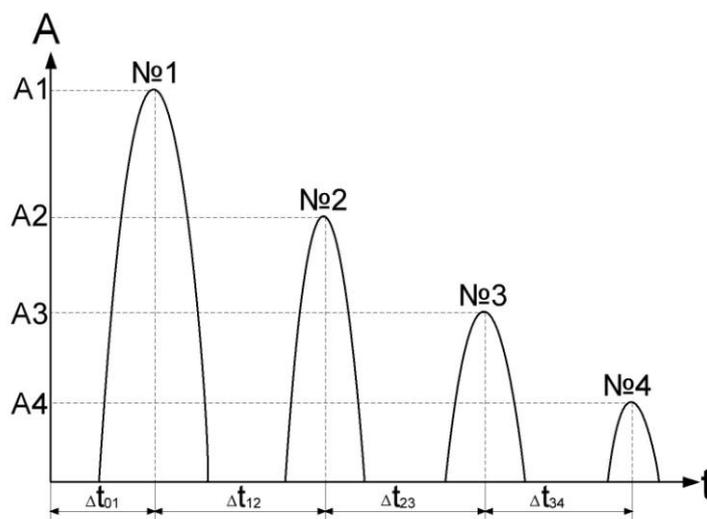
При таком зондировании акустические пакеты, излученные отдельными модулями, горизонтальным ветром последовательно переносятся через сведенные диаграммы направленности антенн радиоканала, начиная с акустического пакета, излученного первым модулем. Поочередное прохождение пакетов дает группу отраженных импульсов со спадающей амплитудой. Обработывая амплитуду и доплеровский сдвиг частоты этих импульсов, их временное положение друг относительно друга, определяют скорость и направление ветра, температуру и влажность воздуха в слое зондирования.

На рисунке представлена группа отраженных радиосигналов, перенесенных на доплеровскую частоту; здесь A – амплитуда, Δt – временные интервалы.

Фотографирование отраженных сигналов с экрана запоминающего осциллографа С8-17 и дальнейшая обработка фотоснимков для получения информации об основных метеовеличинах объясняется двумя обстоятельствами:

а) полным отсутствием практического опыта обработки данных зондирования, полученных с использованием распределенного акустического излучателя, в связи с чем обработка получаемой таким способом информации в ЭВМ на предварительном этапе исследований рассматриваемого способа представляется преждевременной;

б) отсутствием в применяемой традиционной аппаратуре РАЗ технических устройств, выделяющих и регистрирующих максимумы огибающих амплитуд принимаемых радиосигналов, а также интервалы времени между максимумами амплитуды соседних импульсов.



Измерение скорости ветра

Для измерения скорости ветра измеряли временные интервалы между максимумами амплитуды соседних импульсов (по электронной шкале осциллографа в миллисекундах). Расчет горизонтальной скорости ветра W производили по формулам, связывающим геометрические размеры антенного устройства (d_{01} – расстояние между первым модулем и серединой условной линии, соединяющей фазовые центры антенн радиоканала, d – расстояние между соседними модулями) и значения временных интервалов Δt_{ij} . Первый максимум отражения расположен на высоте $R_1 = d_n + (C \cdot \Delta t_{12})$, причем $d_n = 31$ м при длительности зондирующего акустического импульса $\tau = 0,08$ с, а C – скорость приземного звука и Δt_{01} – временной интервал между началом развертки осциллографа и наступлением первого максимума амплитуды. Высота второго максимума отражения – $R_2 = R_1 + (C_{12} \cdot \Delta t_{23})$ и т.д. Тогда скорость ветра в слое атмосферы между высотами R_1 и R_2 составит $W_{12} = \frac{d}{\Delta t_{12}}$.

Экспериментальная оценка эффективности использования распределенного акустического излучателя в системе РАЗ при измерении скорости горизонтального ветра была проведена на метеорологическом полигоне Одесского гидрометеорологического института (ОГМИ) [6] (ныне Одесский экологический университет). В эксперименте использовались данные анеморумбометра М63-МР, размещенного торце мачты, пропеллер которого находился на высоте 50 м относительно подстилающей поверхности. В таблице сведены результаты сравнительных измерений горизонтальной скорости ветра системой РАЗ и анеморумбометром в эксперименте 1.06.90 г. Там же приведены результаты расчета некоторых стати-

стических характеристик ветра: среднее значение скорости ветра, измеряемой сравниваемыми средствами, за 8 мин \bar{W} , среднеквадратическое отклонение этих измерений σ , отклонение результатов измерения скорости ветра сравниваемыми средствами $\Delta = W_{50} - W_{12}$ на близких высотах – первый уровень высоты измерения системой РАЗ и анеморумбометром на высоте 50 м.

Время	R_1 , м	W , м/с	W_{12} , м/с	W_{50} , м/с	Δ , м/с
10-35	17-37	8,1	7,85	7,8	-0,05
10-38	28,9	8,7	8,7	6,8	-1,9
10-39	25,0	10,0	10,0	7,9	-2,1
10-40	27,6	4,6	4,6	7,9	4,41
10-41	27,5	6,6	6,6	7,1	0,5
10-42	24,6	4,9	4,9	5,4	0,5
10-43	23,2	5,1	5,1	7,6	2,5
10-44	25,6	6,5	6,5	5,4	-1,1
		\bar{W} , м/с	6,98	6,78	
		σ	3,7	1,11	

В таблице R_1 – высота первого максимума отражения, W – скорость приземного ветра.

Отметим, что усредненные за 8 мин значения скорости ветра, полученные сравниваемыми средствами, различаются на 0,2 м/с, а среднеквадратическое отклонение между результатами измерений W_{50} и W_{12} составляет $\sqrt{(\Delta^2)} = 0,65$ м/с. Эти результаты указывают на хорошее совпадение результатов измерения сравниваемыми средствами при некотором усреднении, хотя $\sigma_{W_{50}}$ и $\sigma_{W_{12}}$ заметно различаются. Причин этому может быть несколько:

- 1) разное быстродействие сравниваемых средств измерения скорости ветра;
- 2) влияние флуктуаций направления ветра на траекторию перемещения пятна рассеянных радиосигналов по апертуре приемной антенны;
- 3) методическое несовершенство процесса сравнения точечных измерений скорости ветра с помощью анеморумбометра М63-МР и объемных измерений – с помощью аппаратуры РАЗ.

Измерение влажности воздуха

Для определения влажности воздуха обработка данных измерения амплитуды видеоимпульсов проводилась в следующем порядке [6]. По фотографиям принятого сигнала измерялось максимальное значение амплитуды (в относительных единицах) каждого видеоимпульса и интервалы между соседними видеоимпульсами. Используя результаты синхронного измерения периода доплеровской частоты принятых сигналов, рассчитывали скорость звука, после чего определяли высоту зондирования, соответствующую положению максимума каждого видеоимпульса. Измеренные значения амплитуды подвергались математической операции антилогарифмирования, т.к. при выделении амплитуды принятых сигналов использовался детектор с логарифмической характеристикой, обеспечивающей сужение динамического диапазона этих сигналов. Затем в каждое измеренное значение максимума амплитуды видеоимпульсов вводилась поправка на геометрическую расходимость акустического импульса ($\approx 1/R^2$), после чего определялся коэффициент молекулярного поглощения звука в атмосфере. При этом предполагали, что изменение амплитуды принятых сигналов с ростом высоты зондирования происходит по экспоненциальному закону. Влияние же расстройки условия Брэгга на скорость изменения огибающей максимумов амплитуд учитывалось по данным синхронного температурного зондирования, а дополнительное затухание звука за счет турбулентного рассеяния оценивалось приближенно.

Для восстановления значения коэффициента молекулярного поглощения звука использовался ряд видеоимпульсов – от 3 до 4. По специально разработанной программе методом наименьших квадратов по 3-4 значениям амплитуды (вдоль зарегистрированной трассы зондирования) производилась аппроксимация экспериментальной кривой экспонентой вида $A = A_0 e^{-\alpha_x \cdot R}$, где α_x – коэффициент молекулярного поглощения звука, полученный экспериментальным путем. Это значение коэффициента молекулярного поглощения звука сопоставлялось с расчетным значением этого коэффициента для частоты 3,4 кГц (рабочая частота системы РАЗ с распределенным излучателем) и для метеоусловий эксперимента (по данным приземных измерений атмосферного давления, температуры и влажности воздуха) по формулам, приведенным в работе [7].

Оценку реальной применимости системы РАЗ с распределенным излучателем для дистанционного определения влажности атмосферного воздуха произведем по результатам летнего эксперимента (05.07.1990 г.). Начало эксперимента – 10 часов утра. По данным датчиков метеобудки полигона температура воздуха – 25⁰С, относительная влажность воздуха – 84 %, атмосферное давление – 1011 мбар, скорость ветра на высоте 50 м – 3,6 м/с. Расстояние первого модуля акустического излучателя от условной линии, соединяющей фазовые центры антенн радиоканала (по нормали) – 0,5 м, расстояние между соседними модулями – 0,75 м. Для этих метеоусловий расчетное значение коэффициента молекулярного поглощения звука равно $\alpha_m = 0,131 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$, а экспериментальное его значение – $\alpha_x = 0,43 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$. После учета температурного хода по высоте его значение снизилось до $\alpha_{x1} = 0,36 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$. Считая, что в условиях проводимого эксперимента турбулентность развита достаточно хорошо и в таких условиях коэффициент турбулентного затухания звука сравним с коэффициентом молекулярного поглощения [8], получим, что $\alpha_m = \alpha_{x1} / 2 = 0,18 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$. Это значение α_m для условий проведения данного эксперимента соответствует относительной влажности Н=75 %, что достаточно близко к приземному значению относительной влажности в условиях данного эксперимента. Определение влажности выполнено подбором значений относительной влажности и подстановкой их в формулы расчета коэффициента поглощения, представленных в работе [7]; такой подбор производится до совпадения значений теоретического и экспериментального коэффициентов молекулярного поглощения звука.

Полученное же значение относительной влажности было отнесено к высоте 50 м, значение температуры воздуха на которой (поданным температурного РАЗ) имеет значение 23,85⁰С, а атмосферное давление – 1010 мбар.

Выводы

1. Экспериментальное применение распределенного излучателя в системе РАЗ измерения горизонтальной скорости ветра показало, что наблюдается хорошее совпадение результатов измерения сравниваемыми средствами (РАЗ и анеморумбометр) при некотором усреднении, хотя среднеквадратические отклонения результатов измерения системой РАЗ и анеморумбометром заметно различаются в силу методических и технических факторов.

2. Использование распределенного излучателя в системе РАЗ дает реальную возможность одновременной регистрации влажности воздуха в исследуемом слое атмосферы.

3. Распределенный излучатель в системе РАЗ температурного зондирования позволяет повысить точность регистрации профилей температуры за счет использования максимумов амплитуды видеоимпульсов.

4. Системы РАЗ с распределенным акустическим излучателем могут быть выполнены в мобильном варианте для проведения синхронных измерений основных метеорологических величин: скорости и направления горизонтального ветра, температуры и влажности воздуха в полевых условиях.

Список литературы:

1. Бабкин С.И. Особенности антенных устройств систем радиоакустического зондирования атмосферы // Труды IX Всесоюз. симпозиума по лазерн. и акустическому зондированию атмосферы. Ч.2. Исследование метеопараметров атмосферы. Томск : ИОА АН СССР, 1987. С. 167-171.
2. Бабкин С.И., Ковалева Н.А., Сушкова Н.Ф. Расширение диапазона высот радиоакустического зондирования путем оптимизации антенного устройства // Труды X Всесоюз. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч.2. Томск : ИОА АН СССР, 1989. С. 132-136.
3. Бабкин С.И. Радиоакустический способ зондирования атмосферы / Авторское свидетельство № 1658105.
4. Прошкин Е.Г., Карташов В.М., Бабкин, Волох А.В. Современное состояние, проблемы и перспективы систем радиоакустического зондирования // Радиотехника. 2007. Вып.150. С.5-16.
5. Радиоакустическое зондирование атмосферы / Е.Г. Прошкин, С.И. Бабкин, Г.В. Груша и др. Разд.2. // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Б.Л. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. Харьков : Коллегиум, 2002. С. 44-98.
6. Разработка методики радиоакустического зондирования атмосферы для исследования влияния брызговой циркуляции на вертикальное распределение показателя преломления для радиоволн // Отчет по НИР. Закл. Гос. рег. № 0187.0011690 / Науч. рук. С.И.Бабкин. Харьков : ХИРЭ Минвуза УССР, 1990. С. 150-155.
7. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва : Наука, 1985. 197 с.
8. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск : Наука. Сибир. отд-е, 1986. 166 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 12.02.2018