

# РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

УДК 551.501.8:621.396.96

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

## РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

### Введение

К настоящему времени предложен, а в ряде случаев экспериментально апробирован, ряд технологий получения информации об основных метеорологических величинах: составляющих скорости ветра и его направления, температуре и влажности воздуха методом и аппаратурой радиоакустического зондирования (РАЗ) [1]. Такая информация об атмосфере и, особенно, об ее пограничном слое важна для эффективного осуществления многих видов человеческой деятельности. Однако в ряде случаев использование метода и аппаратуры РАЗ не позволяет получать достаточные и достоверные данные о метеорологическом состоянии атмосферы, например [2]. Основные достижения отечественных специалистов в разработке дистанционных способов зондирования, создании экспериментальной аппаратуры и алгоритмов доплеровской обработки данных изложены в фундаментальной монографии [3]. Автором работы [4] предложено применять для обработки данных зондирования корреляционную обработку сигналов систем РАЗ. Как представляется, комбинирование этих видов обработки сигналов может позволить расширить возможности систем РАЗ по извлечению новой информации из данных радиоакустического зондирования атмосферы.

Цель настоящей работы – оценка возможности регистрации новой для метода РАЗ метеорологической величины – скорости вертикальных потоков, необходимой для повышения точности дистанционной регистрации некоторых метеорологических величин, в частности температуры воздуха в пограничном слое атмосферы.

### 1. Технология измерения вертикальной скорости ветра

В теории распространения акустических волн в различных средах существуют два определения скорости этих волн: фазовая и групповая скорость волны [5]. Фазовая скорость распространения акустических волн в реальной атмосфере обуславливается конкретными значениями атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, теплоемкостями сухого воздуха и водяного пара [6]. Эта зависимость может быть записана в виде [7]

$$C_a = f_a \cdot \lambda_a, \quad (1)$$

где  $C_a$  – фазовая скорость,  $f_a$  – частота излученных в атмосферу звуковых колебаний,  $\lambda_a$  – длина акустической волны.

Выражение для групповой скорости пакета акустических волн, который обычно используется при радиоакустическом (в нашем случае – вертикальном) зондировании атмосферы, можно записать в виде [8]

$$C = C_a + W_z, \quad (2)$$

где  $W_z$  – вертикальная составляющая скорости ветра, которая переносит этот пакет как единое целое.

Для задач дистанционного зондирования атмосферы существенным становится несовпадение фазовой и групповой скорости распространения звуковых волн [9]. В частности, при регистрации вертикальных профилей температуры воздуха методом РАЗ атмосферы погрешность измерения воздуха зависит от существования в зондируемом слое атмосферы

вертикальных потоков, формируемых, в основном, интенсивным прогреванием подстилающей поверхности. В работе [10] показано, что при этом каждый метр в секунду скорости вертикального потока вносит погрешность в измерение температуры воздуха 1,68 К.

При измерении скорости распространения пакета акустических волн с помощью доплеровского радиолокатора измеряется групповая скорость, что можно записать с помощью выражения [8]

$$C = \frac{f_d \lambda}{2}, \quad (3)$$

где  $f_d$  – частота доплеровского сдвига электромагнитных сигналов, облучающих акустический пакет;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения.

При использовании корреляционной обработки сигналов системы РАЗ для получения информации о метеорологических величинах информационным параметром является параметр расстройки условия Брэгга

$$q = \lambda - 2\lambda_a.$$

В процессе радиоакустического зондирования и вертикальном распространении акустического пакета интенсивность сигналов, рассеянных акустическим пакетом, зависит от технических параметров используемой аппаратуры, заданной высоты зондирования и значений ряда метеорологических величин, создающих конкретную метеорологическую ситуацию [1, 8]. Фазовая скорость (1) акустических волн в атмосфере зависит от их длины, а их длина может быть определена радиоакустическим зондированием с использованием корреляционной обработки принятых сигналов, позволяющей найти параметр расстройки Брэгга  $q$ , зависящего только от  $\lambda_a$  (поскольку  $\lambda = \text{const}$ ). В работе [11] представлено выражение, пригодное для расчета значений фазовой скорости распространения акустической волны в атмосфере по известным техническим параметрам зондирующей системы и найденному значению  $q$ :

$$C_a = \frac{2\pi f_a}{\frac{4\pi f}{c} - q}, \quad (4)$$

где  $f$  – частота электромагнитного излучения,  $c$  – скорость распространения электромагнитного излучения.

Как показано в работе [12], наибольшее влияние на амплитуду принятых радиосигналов в процессе РАЗ атмосферы оказывает горизонтальный ветер, который выносит зондирующий атмосферу пакет акустических волн из диаграмм направленности антенн радиоканала, вследствие чего амплитуда этих сигналов падает. Данный природный фактор искажает зависимость параметра  $q$ , являющегося информационным параметром при использовании корреляционной обработки принятых радиосигналов, от их амплитуды. Для исключения влияния горизонтального ветра на определение значений  $q$  целесообразно обеспечить синхронное излучение ряда акустических пакетов с помощью распределенного (эшелонированного) акустического излучателя. Такой излучатель состоит из нескольких модулей, питание которых производится одним мощным источником. Модули размещаются на некотором расстоянии друг от друга на прямой (или кривой) линии [12]. Количество модулей определяется заданным количеством точек измерения вертикальной скорости ветра на трассе зондирования. При использовании такого распределенного акустического излучателя зондирующие пакеты горизонтальным ветром последовательно вносятся в диаграммы направленности радиоантенн, а принятый радиосигнал на выходе приемника представляет собой группу импульсов напряжения, количество которых соответствует количеству используемых модулей (при достаточном энергетическом потенциале системы РАЗ). В таком случае форма огибающей

линии этой группы импульсов, построенной по максимальным значениям амплитуды этих импульсов, обуславливается только зависимостью от параметра  $q$ .

Значения вертикальной скорости ветра при использовании предлагаемой методики можно рассчитать для тех точек (уровней) трассы зондирования, которым отвечает временное положение максимума очередного импульса амплитуды, начиная с первого. Временное положение этих импульсов определяется одним из известных способов: перебором числовых значений массива амплитуд принятого импульса на ЭОМ, применением цифрового пикового амплитудного детектора и др. В случае применения аналогового пикового детектора такой детектор в момент достижения импульсом своего максимума генерирует импульс запуска доплеровской и корреляционной обработки принятых сигналов.

В соответствии с изложенной методикой зондирования для выбранной точки на трассе с помощью доплеровской обработки принятого сигнала находят значение доплеровского сдвига частоты  $f_d$ , которое используют для расчета групповой скорости акустического пакета на рассматриваемой высоте в соответствии с выражением (3). Одновременно с помощью корреляционной обработки того же сигнала получают значение параметра расстройки  $q$  и рассчитывают значение фазовой скорости акустического пакета на той же высоте по выражению (4). Полученные данные позволяют вычислить значение вертикальной скорости ветра для выбранной точки по расчетной формуле

$$W_z = C - C_a = \frac{f_d \lambda}{2} - \frac{2\pi f_a}{\frac{4\pi f}{c} - q}. \quad (5)$$

Полученное в результате зондирования атмосферы значение вертикальной скорости ветра интересно не только само по себе. Информация, полученная с использованием предложенного алгоритма (5), дает реальную возможность синхронной регистрации вертикальных профилей температуры воздуха с потенциальной для метода РАЗ точностью. С целью повышения точности регистрации вертикальных профилей температуры воздуха с помощью апробированной в экспериментах доплеровской обработки принятых сигналов необходимо провести корректирование значения групповой скорости звука, вводя измеренное значение вертикальной скорости ветра в выражение (2). Иным способом повышения точности регистрации вертикальных профилей температуры воздуха может быть расчет температуры воздуха по полученному значению фазовой скорости звука, которое при предложенной методике зондирования не зависит от составляющих скорости ветра. Совместная информация о вертикальных профилях температуры воздуха и вертикальной составляющей скорости ветра дает возможность для определения еще одной физической характеристики пограничного слоя атмосферы – потока тепла. Кроме того, при применении распределенного акустического излучателя в антенном устройстве системы РАЗ можно измерить горизонтальную скорость ветра, используя данные о временном интервале между появлением смежных максимумов амплитуды принятых сигналов и данных о пространственном разнесении соседних модулей  $R$  в соответствии с выражением

$$W_x = \frac{R}{\Delta t},$$

где  $\Delta t$  – временной интервал между появлением соседних максимумов амплитуды.

## 2. Оценка погрешности измерения вертикальной скорости ветра

Относительная среднеквадратическая погрешность вычисления вертикальной скорости ветра по выражению (5) может быть записана в виде уравнения полной погрешности (при условии некоррелированности источников погрешности) в соответствии с [13]:

$$\frac{\sigma W_z}{W_z} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_z}{\partial f_d} \frac{\sigma f_d}{f_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial \lambda} \frac{\sigma \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial f_a} \frac{\sigma f_a}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial f} \frac{\sigma f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial c} \frac{\sigma c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial q} \frac{\sigma q}{q}\right)^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial W_z}{\partial f_d} = \frac{\lambda}{2}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial \lambda} = \frac{f_d}{2}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial f_a} = \frac{2\pi c}{4\pi f - cq}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial f} = -\frac{8\pi^2 f_a c}{(4\pi f - cq)^2}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial c} = \frac{2\pi f_a (1 + cq)}{4\pi f - cq},$$

$$\frac{\partial W_z}{\partial q} = \frac{2\pi f_a c^2}{(4\pi f - cq)^2}. \quad (7)$$

Для оценки значения относительной среднеквадратической погрешности измерения вертикальной скорости ветра необходимо задаться значениями параметров, входящих в расчетное выражение (5). К примеру, 10-сантиметровая система РАЗ, использованная в сериях сравнительных экспериментов [2], имела такие параметры:  $F = 6800$  Гц и  $f = 3 \cdot 10^9$  Гц, а при  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с,  $T \approx 18$  °С,  $C_a = 342$  м/с,  $q = 0$ ,  $f_d = 6800$  Гц (в предположении, что в эксперименте выполняется условие Брэгга). Значения коэффициентов влияния в (7) в этом случае таковы:

$$\frac{\partial W_z}{\partial f_d} = 5 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial \lambda} = 3400; \quad \frac{\partial W_z}{\partial f_a} = 5 \cdot 10^{-2};$$

$$\frac{\partial W_z}{\partial f} = -7 \cdot 10^{-8}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial c} = 170; \quad \frac{\partial W_z}{\partial q} = 2,7. \quad (8)$$

Анализируя результаты (8), следует отметить, что наиболее влияние на среднеквадратическую погрешность вычисления горизонтальной скорости ветра в (8) оказывают погрешности измерения (воспроизведения) длины волны радиопередатчика и определения параметра Брэгга, в меньшей степени – погрешности измерения частоты зондирующего звука и частоты доплеровского сдвига.

Значения большинства относительных среднеквадратических погрешностей измерения параметров, входящих в выражение (8), могут быть взяты из работ [14, 15]:

$$\frac{\sigma F}{F} = 15 \cdot 10^{-12}; \quad \frac{\sigma f}{f} = 0,3 \cdot 10^{-16}; \quad \frac{\sigma \lambda}{\lambda} = 10^{-6}; \quad \frac{\sigma q}{q} \approx 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ и } \frac{\sigma c}{c} = 0,5 \cdot 10^{-6}. \quad (9)$$

Подставляя данные из (8), (9) и данные оценок погрешности измерения скорости звука из работы [16] в уравнение погрешности (6) и используя критерий ничтожной погрешности, получаем значение относительной среднеквадратической погрешности измерения вертикальной скорости ветра

$$\frac{\sigma W_z}{W_z} = 3,8 \cdot 10^{-2} \approx 4 \cdot 10^{-2},$$

что при измеряемой вертикальной скорости ветра  $W_z = 1$  м/с, средней скорости для пограничного слоя [17], даст среднеквадратическую погрешность измерения вертикальной скорости ветра  $\sigma W_z = 0,04$  м/с.

Полученное значение инструментальной погрешности измерения вертикальной составляющей скорости ветра находится на уровне такой же погрешности акустических ветровых профилеров, например содара Scientec MFAS [18], однако рассматриваемая технология в сочетании с другими современными РАЗ-технологиями [14, 19], не доступными акустическо-

му зондированию, может оказаться более перспективной при организации метеорологических наблюдений атмосферы при ее экологическом мониторинге.

## Выводы

1. Применение комбинированной обработки сигналов систем РАЗ: доплеровской и корреляционной дает реальную возможность дистанционной регистрации высотных профилей вертикальной составляющей скорости ветра.

2. Достаточную для практики метеонаблюдений погрешность измерения вертикальной составляющей скорости ветра радиоакустическим зондированием можно обеспечить, используя в системе РАЗ распределенный акустический излучатель.

3. Полученные знания о значениях вертикальной составляющей скорости ветра по трассе зондирования позволяют синхронно получать информацию о вертикальном профиле температуры воздуха с потенциальной для метода РАЗ точностью.

4. Введение в антенное устройство системы РАЗ распределенного акустического излучателя расширяет возможности данного метода: позволяет одновременно измерять и горизонтальную составляющую скорости ветра.

**Список литературы:** 1. *Vogt S.* Advances in RASS since 1990 and practical application of RASS to air pollution and the ABL studies // Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. in Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans (ISARS). – Moscow, 1996. – P. G.37 – G.50. 2. *Бочарова И.Е., Иванов В.Н., Орлов М.Ю.* Влияние вертикальной составляющей ветра на результаты температурного радиоакустического зондирования // Труды ИЭМ. – 1988. – Вып. 46 (136). – С. 14 – 19. 3. *Радиоакустическое зондирование атмосферы* / Прошкин Е.Г., Бабкин С.И., Г.В.Груша и др. // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Кашеева Б.Л., Прошкина Е.Г., Лагутина М.Ф. – Харьков : Коллегиум, 2002. – Разд.2. – С. 44 – 98. 4. *Карташов В.М.* Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы. – Харьков : ХНУРЭ, 2011. – 233 с. 5. *Г.С.Горелик.* Колебания и волны. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. – 572 с. 6. *Головин Н.Я.* Акустические артиллерийские приборы. Ч.1. Физические основы устройства акустических приборов. – М. : Воениздат, 1940. – 410 с. 7. *Ультразвук.* Маленькая энциклопедия ; гл. ред. *И.П. Голямина.* – М. : Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с. 8. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 195с. 9. *Осташев В.Е.* Распространение звука в движущихся средах. – М. : Наука, 1992. – 206с. 10. *Frankel M.S. and Peterson A.M.* Remote temperature profiling in the lower Troposphere // Radio Science. – 1976. – V.11, №3. – P. 157 – 166. 11. *В.М.Карташов, А.В.Волох, В.В.Радионова.* Тела неопределенности зондирующих сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. – Вып. 150. – 2007. – С.94 – 99. 12. *Прошкин Е.Г., Карташов В.М., Бабкин С.И., Волох А.В.* Современное состояние, проблемы и перспективы систем радиоакустического зондирования. – Радиотехника. – 2010. – Вып. 150. – С.5 – 16. 13. *Кукуш В.Д.* Определение погрешностей результатов и средств измерений. – Харьков : ХПИ, 1979. – 113с. 14. *В.М.Карташов, С.И.Бабкин, М.В.Кушнир.* Совершенствование технологий радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. – 2014. – Вып. 178. – С.5 – 12. 15. *Бабкин С.И.* Анализ погрешностей регистрации профилей температуры воздуха доплеровским и корреляционным способами // Радиотехника. – 2012. – Вып.169. – С. 72 – 78. 16. *Бабкин С.И.* О точности измерения скорости звука в атмосфере доплеровским радиолокатором // Радиотехника. – Харьков : Вища шк., 1979. – Вып. 50. – С. 67 – 72. 17. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 263 с. 18. *Акустический ветровой профилиер Scientec MFAS* <http://www.ecoenergoteh.com/products-sodar/mfas> (дата обращения – 17.11.2014 г.). 19. *Карташов В.М., Бабкин С.И., Куля Д.Н.* К вопросу о возможности регистрации влажности воздуха при корреляционной обработке сигналов системы радиоакустического зондирования // Радиотехника. – 2013. – Вып.172. – С. 67 – 71.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 25.09.2014