

## К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА ПРИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

### Введение

Создание способов дистанционного измерения влажности воздуха, этой важнейшей метеорологической величины атмосферы, вызывает необходимость решения целого ряда научных и технических проблем. К настоящему времени известны работы, например [1, 2], авторы которых рассматривали возможность использования акустических и электромагнитных волн различных участков диапазона для разработки эффективных способов измерения влажности. В этом же ряду стоит и метод радиоакустического зондирования (РАЗ), использование которого для решения такой задачи представлено в работах [3 – 6]. Однако некоторые особенности, присущие только методу РАЗ и существенно отличающие такой метод от доплеровской радиолокации точечных целей, заметно затруднили внедрение его в практику метеонаблюдений. В частности, это необходимость непрерывного поддержания условия Брэгга при распространении акустического пакета по трассе зондирования; при этом достигается потенциальная точность регистрации температуры воздуха, скорости и направления ветра [7]. Существование высотного хода температуры воздуха в атмосфере, особенно заметного в пограничном ее слое, приводит к нарушению условия Брэгга, в результате чего снижается эффективность метода.

Авторами работы [8] предложен корреляционный способ обработки отраженного от акустического пакета радиосигнала, позволяющий повысить эффективность метода РАЗ: снизить зависимость погрешности регистрации профиля температуры от точности поддержания условия Брэгга [9] и ускорить регистрацию профилей. Информацию о скорости акустического пакета в этом способе несет параметр расстройки условия Брэгга. В отличие от доплеровского способа обработки сигналов, для которого разработаны и апробированы в экспериментах методики зондирования и алгоритмы извлечения метеорологической информации из данных РАЗ, в частности при регистрации влажности [4], для корреляционной обработки эти практические вопросы находятся в стадии решения.

### Разработка способа регистрации вертикального профиля влажности воздуха

Широко известно, например [10], что во время распространения звуковых волн в атмосфере наблюдается не только ослабление их энергии, но еще и явление дисперсии скорости звука: зависимость скорости звука от влажности воздуха. Дисперсия скорости звука появляется в случае, когда действие акустической волны приводит к неравновесному состоянию среды, возбуждая внутренние степени свободы газов, которые входят в состав атмосферного воздуха. Перераспределение энергии между поступательными и внутренними степенями свободы осуществляется за некоторый промежуток времени  $\tau$ , который называется временем релаксации. В газах время релаксации зависит от температуры газа, его давления и наличия примесей других газов. В атмосферном воздухе роль такой примеси играет водяной пар. Частота релаксации  $F_p \approx 1/\tau$  влажного воздуха связана с влажностью выражением

$$F_p = kh^{1.3}, \quad (1)$$

где  $k = 3,06 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ ,  $h = \frac{e}{P} \cdot 100\%$  – отношение парциального давления водяного пара  $e$  к полному давлению воздуха  $P$ , в молярных процентах. Парциальное давление водяного пара – одна из количественных характеристик влажности атмосферного воздуха, от которой мож-

но переходить к другим характеристикам влажности [11]. Частоту релаксации, а соответственно, и влажность воздуха, можно найти из выражения, которое связывает скорость звука произвольной частоты  $F$  в газе с релаксационными процессами и имеет вид

$$C^2 = C_0^2 + (C_\infty^2 - C_0^2) \frac{\omega^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2},$$

где  $C_0$  – скорость звука при очень малых частотах,  $C_\infty$  – скорость звука при очень больших частотах, а  $\omega = 2\pi F$ . В атмосфере при вертикальном распространении звука его скорость может быть вычислена в соответствии с выражением [7]

$$C_a = \sqrt{B} \pm W, \quad (2)$$

где  $B = C_0^2 + (C_\infty^2 - C_0^2) \frac{\omega^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2},$

а  $W$  – вертикальная составляющая скорости ветра; т.е., скорость звука в атмосфере зависит от температуры воздуха (в соответствии с формулой Лапласа) и от вертикального ветра.

Для определения частоты релаксации звука при его распространении в реальной атмосфере, а соответственно, и влажности воздуха, необходимо исключить влияние пространственно-временной неоднородности температуры воздуха и скорости ветра на результат измерения скорости звука. С этой целью следует измерить скорость звука двух разных частот, которые одновременно распространяются в атмосфере вертикально вверх. Далее, допуская, что действие температуры воздуха и радиальной (вдоль радиолуча) скорости ветра одинаково на скорость звука двух разных частот, можно выделить разницу скоростей звука, обусловленную влажностью воздуха [5]. Записав уравнение (2) для двух частот звука  $F_1$  и  $F_2$ , и, к тому же, приняв  $F_1 < F_2$ , найдем, что

$$\Delta C = \frac{C_\infty^2 - C_0^2}{2C} \cdot \frac{F_2^2 - F_1^2}{F_p^2}, \quad (3)$$

где  $C = \frac{C_1 + C_2}{2}$ , поскольку  $C_1 \approx C_2$  [10].

Скорость распространения звука в атмосфере при радиоакустическом зондировании возможно вычислить и по значению параметра расстройки условия Брэгга  $q$  в соответствии с выражением [8]

$$C_a = \frac{2\pi F_a}{4\pi f_a / C_e - q}, \quad (4)$$

где  $C_e$  – скорость распространения электромагнитных волн,  $f$  – их частота.

Неизвестный параметр  $q$  для данного случая находится при помощи корреляционной обработки принятых радиосигналов [8]. Осуществив синхронное двухчастотное радиоакустическое зондирование атмосферы и используя корреляционную обработку сигналов, можно определить  $q_1$  и  $q_2$ , которые отвечают скоростям распространения звука с частотами  $F_1$  и  $F_2$  в соответствии с выражением (4), и найти их разницу:

$$\Delta C = \frac{2\pi F_2}{4\pi f_2 / C_e - q_2} - \frac{2\pi F_1}{4\pi f_1 / C_e - q_1}. \quad (5)$$

Тогда уравнение для частоты релаксации, с использованием выражения (3), записывается в виде

$$F_p^2 = \frac{C_\infty^2 - C_0^2}{2C} \cdot \frac{F_2^2 - F_1^2}{\Delta C}. \quad (6)$$

Используя уравнения (1), (3) и (6), найдем выражение, пригодное для вычисления парциального давления водяного пара в воздухе:

$$e = P \cdot 10^{-2} \cdot 10^{0,385 \left\{ \lg \left[ \frac{(C_{\infty}^2 - C_0^2)(F_2^2 - F_1^2)}{2C \cdot \Delta C} \right] - 3,45 \right\}},$$

или (через натуральный логарифм)

$$\begin{aligned} e &= P \cdot 10^{-2} \cdot \exp \left\{ 0,385 \cdot \ln \left[ \frac{(C_{\infty}^2 - C_0^2)(F_2^2 - F_1^2)}{2C \cdot \Delta C} \right] - 7,947 \right\} = \\ &= P \cdot 10^{-2} \cdot \exp \left\{ 0,385 \cdot \ln \left[ \frac{a(F_2^2 - F_1^2)}{2C \cdot \Delta C} \right] - 7,947 \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $e$  и  $P$  выражены в Па,  $a = C_{\infty}^2 - C_0^2$ .

Таким образом, выполнив в эксперименте оценку параметров расстройки  $q_1$  и  $q_2$  по всей трассе зондирования, можно провести регистрацию вертикального профиля влажности воздуха.

### Оценка погрешности регистрации влажности

Следующим важным шагом в исследовании возможности регистрации влажности воздуха РАЗ атмосферы с использованием корреляционной обработки принятых радиосигналов является оценка инструментальной и методической погрешностей измерения этой величины для выяснения применимости рассматриваемого способа для практики метеорологических наблюдений.

Относительная среднеквадратическая погрешность вычисления влажности воздуха по выражению (7) может быть записана, в соответствии с методикой, использованной в [9], в виде уравнения полной погрешности (при условии некоррелированности источников погрешности):

$$\frac{\sigma e}{e} = \sqrt{\left( \frac{\partial e}{\partial P} \frac{\sigma P}{P} \right)^2 + \left( \frac{\partial e}{\partial F_2} \frac{\sigma F_2}{F_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial e}{\partial F_1} \frac{\sigma F_1}{F_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial e}{\partial C} \frac{\sigma C}{C} \right)^2 + \left( \frac{\partial e}{\partial \Delta C} \frac{\sigma \Delta C}{\Delta C} \right)^2}, \quad (8)$$

в котором учтено, что  $a$  вычислено с высокой точностью и погрешностью вычисления можно пренебречь.

Частные производные по всем параметрам (коэффициенты влияния):

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial P} &= z; \quad \frac{\partial e}{\partial F_2} = z \cdot \frac{0,77 \cdot F_2 \cdot P}{(F_2^2 - F_1^2)}; \quad \frac{\partial e}{\partial F_1} = -z \cdot \frac{0,77 \cdot F_1 \cdot P}{(F_2^2 - F_1^2)}; \\ \frac{\partial e}{\partial C} &= -z \cdot \frac{0,385 \cdot P}{C}; \quad \frac{\partial e}{\partial \Delta C} = -z \cdot \frac{0,385 \cdot P}{\Delta C} \end{aligned} \quad (9)$$

где  $z = 10^{-2} \exp \left\{ 0,385 \cdot \ln \left[ \frac{a(F_2^2 - F_1^2)}{2C \cdot \Delta C} \right] - 7,947 \right\}$ .

С учетом (9) уравнение (8) приводится к виду

$$\begin{aligned} \frac{\sigma e}{e} &= z \sqrt{\left( \frac{\sigma P}{P} \right)^2 + \left( \frac{0,77 \cdot P}{(F_2^2 - F_1^2)} \right)^2 (\sigma F_2)^2 + \left( \frac{0,77 \cdot P}{(F_2^2 - F_1^2)} \right)^2 (\sigma F_1)^2 + \\ &+ \left( \frac{0,385 \cdot P}{C^2} \right)^2 (\sigma C)^2 + \left( \frac{0,385 \cdot P}{(\Delta C)^2} \right)^2 (\sigma \Delta C)^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

Для оценки относительной среднеквадратической погрешности измерения температуры необходимо задаться значениями параметров, входящих в расчетное выражение (8).

Пусть  $P = 101325 \text{ Па}$  (стандартная атмосфера);  $C = 340,294 \text{ м/с}$ ;  $F_p = 5.1 \text{ кГц}$ ;  $F_1 = 3.4 \text{ кГц}$ ;  $F_2 = 6,8 \text{ кГц}$ ;  $\Delta C = 20 \text{ м/с}$ ;  $f_2 = 3 \text{ ГГц}$ ;  $f_1 = 1,5 \text{ ГГц}$ ;  $q = 0$ . При этих значениях  $z = 2 \cdot 10^{-4}$ .

Вычислим коэффициенты влияния в выражении (10):

$$\frac{\sigma_e}{e} = z \sqrt{9,7 \cdot 10^{-11} (\sigma P)^2 + 5,06 \cdot 10^{-6} (\sigma F_2)^2 + 5,06 \cdot 10^{-6} (\sigma F_1)^2 + 0,1 (\sigma C)^2 + 9,5 \cdot 10^3 (\sigma \Delta C)^2}.$$

Как видно из данного выражения, наибольшее влияние на величину относительной среднеквадратической погрешности определения давления водяного пара имеют погрешности измерений разности скоростей  $\Delta C$  и средней скорости двух пакетов  $C$ . Погрешности измерения давления воздуха и звуковых частот невелики. Поэтому остановимся на анализе погрешностей измерения  $\Delta C$  и  $C$ .

Согласно формуле (5)  $\Delta C = C_2 - C_1$ , а  $C = C_1/2 + C_2/2$ . Тогда уравнения полной погрешности для величин  $\Delta C$  и  $C$  имеют вид:

$$\frac{\sigma \Delta C}{\Delta C} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta C}{\partial C_2} \cdot \frac{\sigma C_2}{C_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta C}{\partial C_1} \cdot \frac{\sigma C_1}{C_1}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma C_2}{C_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma C_1}{C_1}\right)^2}; \quad (11)$$

$$\frac{\sigma C}{C} = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial C_2} \cdot \frac{\sigma C_2}{C_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial C_1} \cdot \frac{\sigma C_1}{C_1}\right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\sigma C_2}{C_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma C_1}{C_1}\right)^2}. \quad (12)$$

Для вычисления погрешностей (11), (12) необходимо определить  $\frac{\sigma C_a}{C_a}$ . Исходя из расчетной формулы (4), запишем выражение

$$\frac{\sigma C_a}{C_a} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_a}{\partial F_a} \cdot \frac{\sigma F_a}{F_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_a}{\partial f_a} \cdot \frac{\sigma f_a}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_a}{\partial C_e} \cdot \frac{\sigma C_e}{C_e}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_a}{\partial q} \cdot \frac{\sigma q}{q}\right)^2}. \quad (13)$$

Значения относительных среднеквадратических погрешностей измерения параметров, входящих в выражение (13), оценены по известным методикам и приведены в [9]:

$$\frac{\sigma F_a}{F_a} = 15 \cdot 10^{-12}; \quad \frac{\sigma f}{f} = 0,3 \cdot 10^{-16}; \quad \frac{\sigma C_e}{C_e} = 0,5 \cdot 10^{-6}; \quad \frac{\sigma q}{q} \approx 1,4 \cdot 10^{-2}. \quad (14)$$

Как видно из выражений (14), наибольшее влияние на величину относительной среднеквадратической погрешности определения скорости звука имеет погрешность измерения расстройки условия Брэгга  $q$ . Остальными значениями погрешностей измерения параметров, входящих в выражение (13), можно пренебречь в связи с их малыми значениями. Таким образом,

$$\frac{\sigma C_a}{C_a} \approx \sqrt{\left(\frac{\partial C_a}{\partial q} \cdot \frac{\sigma q}{q}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2\pi F_a}{(4\pi f_a / C_e - q)^2}\right)^2 \left(\frac{\sigma q}{q}\right)^2} \quad (15)$$

С помощью (15) найдем, что погрешность измерения  $\frac{\sigma C_1}{C_1} = 7,5 \cdot 10^{-2}$ ;  $\frac{\sigma C_2}{C_2} = 3,7 \cdot 10^{-2}$ .

Подставив вычисленные погрешности измерения скорости звука в выражения (11), (12) получим, что  $\frac{\sigma \Delta C}{\Delta C} = 8,3 \cdot 10^{-2}$ , а  $\sigma \Delta C = 1,6 \text{ м/с}$ ;  $\frac{\sigma C}{C} = 4,1 \cdot 10^{-2}$ , а  $\sigma C = 13,6 \text{ м/с}$ . Тогда относительная среднеквадратическая погрешность измерения влажности воздуха составит

$$\frac{\sigma_e}{e} = z \sqrt{0,11(\sigma_C)^2 + 9,5 \cdot 10^3 (\sigma_{\Delta C})^2} \approx 3,12 \cdot 10^{-2},$$

т.е. примерно (3 – 3,5) % давления водяного пара (или около 3 % относительной влажности).

Полученное значение инструментальной погрешности измерения влажности воздуха рассматриваемым способом находится на уровне погрешности штатных датчиков влажности, широко применяемых на сети метеорологических наблюдений (3 – 7 %) [13, 14].

Оценка значений составляющих методической погрешности является предметом дальнейших исследований, поскольку на информационный параметр  $q$  заметно влияет ряд атмосферных явлений [9].

### Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Инструментальная погрешность измерения влажности воздуха аппаратурой РАЗ с использованием корреляционной обработки принятых сигналов согласуется по значению с погрешностями датчиков прямого измерения, что позволяет использовать релаксационные (тонкие) процессы, происходящие при распространении звуковых волн в реальной атмосфере, для дистанционной регистрации вертикальных профилей влажности.

2. При корреляционной обработке сигналов для оценки влажности воздуха заметно увеличивается количество изменчивых по высоте атмосферных факторов, которые формируют методическую погрешность регистрации влажности, что требует дальнейших исследований.

**Список литературы.** 1. *Зуев В.Е.* Лазер-метеоролог. – М. : Сов. радио, 1974. – 184 с. 2. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферы. – Новосибирск : Наука, 1986. – 67 с. 3. *Орлов М.Ю., Юрчак Б.С.* О возможности определения влажности в приземном слое атмосферы радиоакустическим зондированием // Труды ИЭМ Госкомгидромета. – 1985. – № 38/121. – С. 14-20. 4. *Бабкин С.И., Максимова Н.Г., Панченко А.Ю., Прошкин Е.Г., Ульянов Ю.Н.* Измерения влажности воздуха радиоакустическим зондированием атмосферы // Труды IX Всесоюз. симпозиума по лазер. и акустическому зондированию атмосферы. – Ч.2. Исследование метеопараметров атмосферы. – Томск, 1987. – С. 145-148. 5. *Бабкин С.И., Васильченко Е.А.* Радиоакустический способ определения влажности воздуха. А.С.№ 1670641 (СССР), опубл. 15.08.91, бюл. № 30. 6. *Бабкин С.И.* Способ определения влажности воздуха радиоакустическим зондированием атмосферы. А. С. № 1780071 (СССР), опубл. 07.12.92, бюл.№ 45. 7. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 197 с. 8. *Карташов В.М., Волох А.В., Радионова В.В.* Тела неопределенности зондирующих сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. – 2007. – Вып. 150. – С. 94 -99. 9. *Бабкин С.И.* Анализ погрешностей регистрации профилей температуры воздуха доплеровским и корреляционным способами // Радиотехника. – 2012. – Вып. 169. – С.72-78. 10. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. *И.П.Голяминой.* – М. : Сов. энциклопедия. – 1979. – 400 с. 11. *Хргиан А.Х.* Физика атмосферы. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 647 с. 12. *Карташов В.М., Бабкин С.И., Куля Д.М.* Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для реєстрації вертикального профілю температури. Патент України № 97612. Опубл. 27.02.2012, бюл.№4. 13. *Стернзат М.С.* Метеорологические приборы и измерения. – Л. : Гидрометеиздат. – 1978. – 392 с. 14. *Тактическая система метеорологических наблюдений.* [www.raimet.ru/index.ph?p=equipment](http://www.raimet.ru/index.ph?p=equipment).

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию