

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОВЕЛИЧИН ПРИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ СИСТЕМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Сообщение 2

Введение

В предыдущем сообщении [1] рассмотрено влияние ряда факторов на формирование методических погрешностей измерения метеорологических величин аппаратурой радиоакустического зондирования (РАЗ), в котором применяется корреляционная обработка принятых радиосигналов. В частности, показано, что при регистрации вертикальных температурных профилей с применением комплексной технологии обработки сигналов источником достаточно весомых методических погрешностей является отсутствие априорной информации о таких метеорологических величинах, как скорость ветра, количество водяного пара в воздухе, турбулентность атмосферы; существенным является также отсутствие информации о вертикальном распределении указанных параметров.

Данная работа посвящена оценке методических погрешностей измерения влажности воздуха, возникающих за счет априорной неопределенности высотного распределения других метеорологических величин, анализу их влияния при регистрации вертикальных профилей измеряемой метеорологической величины с использованием корреляционной обработки принятых сигналов систем радиоакустического зондирования.

Регистрация профилей влажности

1. Анализ расчетной формулы

Известная формула для определения влажности воздуха методом двухчастотного РАЗ с использованием корреляционной обработки данных зондирования имеет вид [2]

$$e = P \cdot \exp \left\{ 0,385 \cdot \ln \left[\frac{(C_{\infty}^2 - C_0^2)(f_2^2 - f_1^2)}{2C \cdot \Delta C} \right] - 7,947 \right\}, \quad (1)$$

где e – парциальное давление водяного пара, гПа; P – полное давление воздуха, гПа; C_0 – скорость звука при очень малых частотах, м/с; C_{∞} – скорость звука при очень больших частотах, м/с; f_1 и f_2 – частоты зондирующего звука, с⁻¹; ΔC – разность скоростей звука

этих частот C_1 и C_2 соответственно, м/с; а $C = \frac{C_1 + C_2}{2}$, поскольку $C_1 \approx C_2$ [3].

Вследствие отсутствия экспериментальных данных по измерению скоростей C_1 и C_2 при определении влажности воздуха двухчастотным РАЗ с корреляционной обработкой данных зондирования репрезентативность формулы (1) на практике не проверялась. Нами для оценки практической применимости указанной формулы выполнен численный эксперимент, основанный на использовании табличных данных для коэффициента молекулярного поглощения звука во влажном воздухе, приведенных в работе [4].

Авторами [5] предложено выражение, позволяющее рассчитать скорость звука C по известным параметрам зондирующей системы и найденному в эксперименте значению параметра Брэгга:

$$C = \frac{2\pi f_n}{\frac{4\pi f_e}{c} - q}, \quad (2)$$

где f_n – частота синусоидального заполнения акустического пакета; f_e – рабочая частота радиолокатора; c – скорость распространения радиоволн; q – параметр расстройки условия Брэгга.

Для численных расчетов нами использованы значения частот звука 80 и 7150 Гц, которые близки к значениям частот, используемых в известных системах РАЗ: низкочастотной (19 Гц) [6] и высокочастотной (6800 Гц) [7]. Для выбранных частот известны табличные значения коэффициентов молекулярного поглощения звука во влажном атмосферном воздухе [4]. В вычислительном эксперименте предполагалось равенство энергетических потенциалов каждого из радиоканалов. Для заданных метеорологических условий рассчитывалось ослабление принимаемой мощности в каждом канале за счет молекулярного поглощения [1, 4], определялись значения параметров q_1 и q_2 , после чего – значения C_1 и C_2 .

Наиболее неопределенным в уравнении (1) является теоретический множитель $(C_\infty^2 - C_0^2)$, описывающий эффекты дисперсии скорости звука во влажном воздухе. Для определения численного значения этого множителя используем приближенные формулы, приведенные в ряде работ. В частности, из работы [8] следует

$$C_\infty^2 / C_0^2 \approx 1 + \varepsilon \text{ при } \varepsilon = 0,2 \cdot 0,0032, \quad (3)$$

где ε – релаксационная сила.

Это означает, что изменение скорости звука во влажном воздухе вследствие колебательной релаксации не может быть выше 0,032%. В то же время, в работе [9] указано, что при температуре 20°C разность скоростей звука в воздухе

$$C_\infty - C_0 = 0,12 \text{ м/с.} \quad (4)$$

Для количественной оценки значения множителя $(C_\infty^2 - C_0^2)$ была решена система двух уравнений (3) и (4) с двумя неизвестными – C_∞ и C_0 . В результате оказалось, что $C_0 = 375 \text{ м/с}$, а $C_\infty = 375,12 \text{ м/с}$. При таких значениях этих скоростей множитель $(C_\infty^2 - C_0^2) = 90,0144 \text{ (м/с)}^2$.

Для метеорологических условий с атмосферным давлением 1013,25 гПа, температурой 20°C и относительной влажностью $H = 40\%$ с использованием формулы (1) было рассчитано парциальное давление водяного пара, равное 24,9 гПа. Однако это значение не соответствует табличным данным метеорологических величин. Для согласования данных расчета и табличных данных в формулу (1) необходимо ввести корректирующий коэффициент $k = 0,375$, учитывающий приближения, введенные в работах [8, 9]. Тогда для заданных выше метеорологических условий парциальное давление водяного пара $e = 9,35 \text{ гПа}$, и это достаточно точно соответствует данным метеорологических таблиц.

Результатом проведенного анализа является рабочая формула, пригодная для расчетов влажности по данным двухчастотного радиоакустического зондирования атмосферы с корреляционной обработкой данных амплитудных измерений:

$$e = P \cdot \left\{ k \exp \left[0,385 \cdot \ln \frac{(C_\infty^2 - C_0^2)(f_2^2 - f_1^2)}{2C \cdot \Delta C} - 7,947 \right] \right\}, \quad (5)$$

где $k = 0,375$ – корректирующий коэффициент.

Основываясь на результатах численного эксперимента, выполненного с учетом приближенного и нелинейного характера зависимостей, описывающих молекулярное поглощение звука в воздухе, которые представлены в работах [4, 8, 9] и использованы при выводе формулы (1), можно полагать, что доработанная формула (5) репрезентативна.

2. Влияние атмосферной турбулентности

При оценке возможностей метода РАЗ для измерения влажности атмосферного воздуха, различные исследователи в вопросе о влиянии турбулентности на погрешность таких измерений придерживались различных взглядов. В частности, авторы работы [7] предполагали, что одновременное (или череспериодное с последующим совмещением) измерение амплитуды принятых радиосигналов при двухчастотном РАЗ атмосферы позволяет исключать влияние турбулентности на погрешность измерения влажности на близких частотах 3400 и 6800 Гц [7]. Результаты экспериментальных исследований показали, что в условиях неподвижной атмосферы две последовательно зарегистрированные, а затем совмещенные во времени огибающие амплитуд действительно оказывались подобными по форме, но имели различные показатели экспоненты. Однако по мере возникновения и развития турбулентности степень корреляции между огибающими заметно снижалась, а результаты расчета влажности становились некорректными. Исследованиями было установлено, что теоретически неучтенная частотная зависимость коэффициента турбулентного рассеяния звука и поперечного масштаба когерентности фазового фронта звуковой волны при доплеровском двухчастотном способе амплитудных измерений влажности могли приводить к значению методической погрешности измерения в (20 – 40) % значений относительной влажности [10, 11].

Оценку влияния мелкомасштабной турбулентности на методическую погрешность измерения влажности воздуха рассматриваемым способом проведем, используя методику работы [1] с учетом особенности способа: для получения информации о количестве водяного пара в воздухе необходимо применять пару звуковых частот. Сделаем это для двухчастотной системы РАЗ [7], с помощью которой были получены экспериментальные результаты измерения влажности амплитудным способом. Такой подход позволит сравнить значения методических погрешностей измерения влажности при доплеровской и корреляционной обработке принятых сигналов.

Хорошо известно, что основными факторами, влияющими на среднюю принимаемую мощность приемником системы РАЗ в дециметровом диапазоне длин волн, являются частотный характер зависимости коэффициента турбулентного рассеяния звука и нарушение поперечной когерентности фазового фронта акустической волны [4, 10, 11]. Преобладающим фактором из двух указанных является деформация фазового фронта акустической волны [12]. Поэтому оценим влияние только эффекта нарушения поперечной когерентности фазового фронта акустической волны.

С этой целью проведем расчеты, используя выражения (3) – (8) из работы [1], для двух рабочих частот звукового излучателя указанной выше системы РАЗ (3400 и 6800 Гц) при следующих метеорологических условиях: полное атмосферное давление 1022,25 гПа, температура воздуха 293,15 К, относительная влажность воздуха 40 %. Результаты расчетов показали, что при выполнении измерений влажности воздуха на высотах 50 и 100 м, с помощью известной двухчастотной системы РАЗ [7] и применения корреляционной обработки амплитуды принятых радиосигналов, методическая погрешность измерений может достигать 100 % от значений относительной влажности, даже при термической турбулентности. Такой результат может оказаться естественным для использованных в расчетах значений технических параметров этой двухчастотной системы РАЗ с произвольно выбранными рабочими частотами и конструкцией антенных устройств радио- и звукового каналов.

Прежде всего, это малый разнос зондирующих частот (эффекты дисперсии скорости во влажном атмосферном воздухе при небольшом разнесе звуковых частот проявляются слабо). В работе [3] показано, что в зависимости от количества водяного пара в атмосфере положение релаксационной частоты, а с ней и дисперсионной ступеньки, меняется на частотной оси. Поэтому для минимизации методической погрешности измерений влажности в заданных метеорологических условиях необходимо выбирать зондирующие звуковые частоты так, чтобы они располагались на верхней и нижней границах дисперсионной ступеньки.

Кроме того, конструкция антенных устройств данной системы не соответствует требованиям формирования необходимой области взаимодействия радио- и звукового пучков [4]. Поэтому при разработке двухчастотных систем РАЗ для экспериментальных исследований по дистанционной регистрации вертикальных профилей характеристик влажности с заданной методической погрешностью и с использованием корреляционной обработки принятых радиосигналов следует учитывать эти особенности рассматриваемого способа. Поиск пары оптимальных частот для зондирования с целью минимизации методической погрешности измерения влажности в условиях турбулентной атмосферы является предметом дальнейших исследований.

3. Влияние горизонтального ветра на погрешность измерений

Одним из метеорологических факторов, влияющих на погрешность измерения влажности воздуха рассматриваемым способом, является горизонтальный ветер. Вследствие влияния этого фактора происходит вынос горизонтальным ветром акустических пакетов двух частот из диаграмм направленности антенн радиоканалов и наблюдается “соскальзывание” обоих пятен рассеянных сигналов с апертуры приемных радиоантенн.

При измерении влажности воздуха на заданной высоте и отсутствии априорной информации о вертикальном распределении горизонтальной скорости ветра к значению разности скоростей распространения звуковых частот C_1 и C_2 , которое определяется количеством

водяного пара в атмосфере, добавляется значение разности скоростей ΔC_q , вызванное изменением параметра Брэгга за счет неопределенности влияния скорости ветра на каждый из двух зондирующих пакетов на высоте регистрации. Это явление может стать причиной возникновения методической погрешности измерения влажности при произвольном выборе технических параметров (в частности, параметров антенных устройств) двухчастотной зондирующей системы и использовании корреляционной обработки данных зондирования. Условия, при которых влияние данного фактора при измерении влажности воздуха двухчастотным РАЗ и использовании в качестве информационного параметра принятых радиосигналов их амплитуды исключается, а методическая погрешность минимизируется, подробно рассмотрены в работе [7]. Важнейшим из этих предпосылок является условие

$$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \frac{\lambda e_1}{\lambda e_2}, \quad (6)$$

где Θ – ширина диаграмм направленности антенн обоих радиоканалов, λ_e – рабочая длина волн этих каналов.

Другим необходимым условием выбора оптимального режима работы двухчастотной системы РАЗ является использование одинаковых значений количества длин волн в акустических пакетах обоих каналов $N_1 = N_2$ (7). При выполнении этого условия обеспечивается равенство значений ширины главных лепестков зависимости мощности рассеяния Брэгга на обеих частотах:

$$p^2_1 = f_1\left(\frac{\lambda_{e1}}{\lambda_{a1}}\right) \quad \text{и} \quad p^2_2 = f_2\left(\frac{\lambda_{e2}}{\lambda_{a2}}\right). \quad (8)$$

4. Влияние вертикальных градиентов температуры воздуха и скорости ветра

Возможный вклад вертикальных градиентов температуры воздуха и скорости ветра в методическую погрешность регистрации вертикального профиля влажности воздуха оценим, опираясь на результаты работы [1]. Как показал анализ, существование вертикальных градиентов основных метеорологических величин приводит к изменению уровня мощности принимаемого сигнала по сравнению с тем, который заложен для корреляционной обработки сигнала, что и приводит к появлению методической погрешности. Однако, если при создании двухчастотной системы РАЗ для дистанционной регистрации вертикальных профилей влажности воздуха с использованием корреляционной обработки принятых радиосигналов выполнены условия (6) и (8) и число волн в звуковых посылках обеих частот одинаково (условие (7)), то сужение (или расширение) диаграмм направленности обоих акустических излучателей под действием вертикального градиента температуры воздуха происходит синхронно и одинаково, а разворот их фазовых фронтов под действием вертикального градиента скорости ветра также оказывается равным. В таком случае дополнительной разности потерь мощности принимаемых радиосигналов в обоих каналах не наблюдается, и методической погрешности измерения влажности воздуха за счет существования вертикальных градиентов метеорологических величин не возникает.

Выводы

1. В случае применения корреляционной обработки принятых радиосигналов в системе РАЗ атмосферы, предназначенной для измерения влажности воздуха, влияние турбулентности атмосферы на методическую погрешность оказывается более значительным, чем при доплеровской обработке.
2. При разработке двухчастотных систем РАЗ заданного метеорологического назначения необходимо обеспечивать разность частот зондирующих звуковых колебаний.
3. Для снижения значений методических погрешностей измерений влажности воздуха, возникающих за счет горизонтального ветра и рефракции звуковых волн в реальной атмосфере, необходимо применять корректные конструктивные решения при разработке антенных устройств и выбирать режимы работы систем зондирования, близкие к оптимальным.

Список литературы. 1. *Карташов, В.М., Бабкин, С.И., Толстых, Е.Г.* Методические погрешности измерения метеовеличин при корреляционной обработке сигналов систем радиоакустического зондирования. Сообщение 1 // Радиотехника. – 2015. – Вып.183. – С.18-23. 2. *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. 3. *Ультразвук.* Маленькая энциклопедия ; гл ред. И. П. Голямина. – М. : Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с. 4. *Каллистратова, М.А., Кон, А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 195 с. 5. *Карташов, В.М., Волох, А.В., Радионова, В.В.* Тела неопределенности зондирующих сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. – 2007. – Вып. 150. – С. 94-99. 6. *Стратосферно-тропосферное радиоакустическое зондирование / В.А.Зиничев, В.О.Рапопорт, В.Ю.Трахтенгерц и др. // Труды X Всесоюз. симп. по лазерн. и акустич. зондир. атмосферы. Ч.2. – Томск, 1989. – С. 74 -78.* 7. *Радиоакустическое зондирование атмосферы / Прошкин Е.Г., Бабкин С.И., Г.В.Груша и др. Разд.2 // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Кашеева Б.Л., Прошкина Е.Г., Лагутина М.Ф. – Харьков : Коллегиум, 2002. С.44-98.* 8. *Harris, C. M. Effect of Humidity on the Velocity of Sound // JASA, v.49, #3, 1971, pp 890-893.* 9. *Физическая акустика ; под ред. У.Мезона // Свойства газов, жидкостей и растворов. Т. II, ч. А ; пер. с англ. под ред. И Г Михайлова. – М. : Мир, 1968. – 487 с.* 10. *Бабкин, С.И., Груша Г.В.* Влияние атмосферной турбулентности на точность определения влажности

- воздуха амплитудным радиоакустическим методом // Оптика атмосферы. – 1990. – Т.3, №10. – С.1064 – 1069.
11. *Бабкин, С.И.* К вопросу измерения влажности воздуха радиоакустическим зондированием // Сб. науч. трудов по материалам 4-й Междунар. конф. “Теория и техника передачи, приема и обработки информации. Новые информационные технологии”. 28-30 сентября 1998 г. Харьков-Туапсе, с. 96-97.
12. *Налбандян, О.Г.* // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1976. – 12, №8. – С. 877-880.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 28.03.2017