

# АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Карташов В. М., Бабкин С. И., Пащенко С. В.  
Харьковский национальный университет радиозлектроники  
г. Харьков, 61166, Украина, пр. Ленина, 14  
тел.: +38-057-702-1587; email: res@kture.kharkov.ua

*Аннотация* — Разработаны двухчастотные фазовые методы дистанционного измерения влажности атмосферного воздуха, которые могут стать альтернативными для амплитудных методов. Небольшие различия в скоростях звука при существовании дисперсии можно зафиксировать путем измерения разности фаз между частотами доплеровских сдвигов частот принимаемых сигналов.

## I. Введение

Изучение возможности дистанционного измерения влажности атмосферного воздуха на базе использования акустических волн к настоящему времени находится на стадии теоретических и, в меньшей степени, экспериментальных, исследований. Данная работа посвящена анализу фазовых методов дистанционного измерения влажности воздуха, использующих акустическую релаксацию во влажном атмосферном воздухе.

## II. Двухчастотные фазовые методы измерения

В основу фазового метода измерения влажности воздуха двухчастотным радиоакустическим зондированием (РАЗ) положена связь частоты релаксации для атмосферного воздуха с его влажностью и скорости распространения звука произвольной частоты в атмосфере с релаксационными процессами в ней. Максимальная разность скоростей звука двух различных, достаточно разнесенных по диапазону, частот составляет лишь  $\Delta C = 0,12$  м/с [1], а разность в частотах доплеровского сдвига отраженных радиосигналов при двухчастотном РАЗ лежит в пределах 1-2 Гц. Если весь диапазон изменений влажности воздуха (например, для умеренных широт) лежит в пределах 30-90% относительной влажности, то при разрешающей способности измерения влажности около 6% (для штатных метеодатчиков широкого применения – гигрометров - это значение составляет 5-7% относительной влажности) необходимо обеспечить 10 отсчетов влажности, т.е. разрешающая способность измерения частоты должна быть примерно равной 0,1-0,2 Гц.

Такие различия в скоростях звука при существовании дисперсии можно зафиксировать путем измерения сдвига фаз между частотами доплеровского сдвига частот принимаемых радиосигналов. Оценка влияния турбулентности атмосферы на измеряемый сдвиг фаз  $\Delta\varphi$  и вносимую турбулентностью погрешность измерения парциального давления водяного пара  $e$  проведена на основе анализа зависимости  $\langle e \rangle / e_0$ , где  $e_0$  - давление парциального пара в нетурбулентной атмосфере, а

$$e = P \exp\{0,385 \ln[A] - 7,947\},$$
$$A = \frac{\pi f r (C_\infty^2 - C_0^2) (f_2^2 - f_1^2)}{C^3 \Delta\varphi},$$

где  $P$  - полное давление воздуха;  $f$  - частота, на которой измеряется сдвиг фаз;  $r$  - высота зондирования;  $C_0$  и  $C_\infty$  - скорости звука на очень малых и очень высоких частотах соответственно;  $C$  - средняя скорость звука в слое;  $f_1$  и  $f_2$  - зондирующие звуковые частоты, от частоты и высоты зондирования при малых флуктуациях сдвига фаз акустических волн и скорости звука.

Оценка  $\langle \Delta\varphi \rangle^{12}$  производилась методом гео-

метрической оптики при условии статистической однородности и изотропности поля случайных фаз акустической волны. В конвективных условиях погрешность измерения влажности, вносимая не только слабой, но и сильной турбулентностью, значительно ниже, чем при определении влажности двухчастотным амплитудным методом (меньше 1%) [2]. В отличие от расчетного выражения (1), полученного при некоторых упрощениях задачи (значения пары зондирующих звуковых частот значительно меньше частоты релаксации, скорости распространения звуковых частот различаются не сильно и т.д.) в работе [2] сняты все ограничения в постановке задачи, оценены значения возможных сдвигов фазы, всесторонне изучено влияние атмосферной турбулентности на двухчастотное фазовое зондирование, исследованы источники погрешностей.

В дальнейшем, получены практически применимые соотношения, позволяющие дополнить дистанционные измерения высотного хода влажности фазовым методом градиентными измерениями метеовеличин (температуры и влажности), что позволяет повысить точность измерения влажности. При инструментальной погрешности измерения сдвига фаз  $\delta(\Delta\varphi) = 1^0$  общая инструментальная погрешность измерения относительной влажности воздуха этим методом оценивается значением (3-5)%.

Для экспериментальной оценки возможности использования двухчастотного фазового метода для дистанционного измерения влажности воздуха была использована комплексированная радиоэлектронная система контроля атмосферных величин [2], в состав которой входит одночастотная система РАЗ (рабочая частота – 440 МГц) и двухчастотный содар (рабочие частоты 1 кГц и 4 кГц). Исследования проводились в различные сезоны года, чаще в погодных условиях, благоприятных для акустического зондирования. Обработка данных показала, что средние значения фазовых сдвигов имеют устойчивый характер с дисперсией, зависящей от погодных условий. Распределение сдвигов фаз приближается к нормальному закону. Зарегистрированные средние значения фазовых сдвигов качественно согласуются с расчетными данными, приведенными в работе [2]. Например, в результате статистической обработки измерений сдвигов фаз при зондировании в мае

1995 года (данные приземных метеорологических измерений следующие: температура воздуха - +20°C, относительная влажность – 60%, атмосферное давление – 102 гПа) получены разности фаз между соседними высотными слоями, находящимися на расстоянии 17 м, близкие к значению  $\Delta\varphi = 1,52^\circ$ . При этом значение сдвига фаз, приходящееся на 1 м,  $\Delta\varphi/\Delta R = 1,52/34 \approx 4,5 \cdot 10^{-2}$  град/м при его теоретическом значении  $\Delta\varphi/\Delta R = 1,02 \cdot 10^{-2}$  град/м. Такие результаты экспериментов позволили предложить иной фазовый метод дистанционного измерения влажности воздуха, чем двухчастотное РАЗ. Этот метод предполагает двухчастотное акустическое зондирование (АЗ) для проведения фазовых измерений (для определения высоты измерения влажности и температуры воздуха на этой высоте), а устройство, реализующее этот метод, может быть построено на основе работы [3]. Обладая всеми преимуществами двухчастотного фазового метода измерения влажности радиоакустическим зондированием, двухчастотный фазовый метод измерения влажности совмещенной аппаратурой АЗ и РАЗ позволит повысить точность определения влажности за счет замены фазовых измерений в радиоканалах фазовыми измерениями в звуковых каналах.

### III. Заключение

Анализ фазовых методов дистанционного измерения влажности атмосферного воздуха, использующих явление акустической релаксации, позволяет сделать следующий вывод. Теоретические и экспериментальные исследования возможности использования акустических волн для дистанционного измерения влажности воздуха показали, что небольшие различия в скоростях звука при существовании её дисперсии можно зафиксировать путем измерения разности фаз между частотами доплеровских сдвигов частот принимаемых сигналов.

### IV. Список литературы

- [1] *Ультразвук*. Маленькая энциклопедия/ Гл. ред. Голямина И.П. М.: Советская энциклопедия. 1979. 400 с.
- [2] Babkin S. I., Delov I. A., Proshkin E. G., Grusha G. V. Measuring the Atmospheric Humidity by the Phase-Shift Depended Acoustic Sounding: Methods and Applicability Estimation. Изд. "Begell House, Inc." №4, USA, "Telecommunications and Radio Engineering", v.55, №12. 2001. P. 17-26
- [3] Бабкін С. І., Карташов В. М., Пащенко С. В., Яценко П. О. Патент № 86555. (Україна). Пристрій для дистанційного визначення вологості атмосферного повітря. Оpubл. у Б.І. 2009. № 8.

## ANALYSIS OF PHASE REMOTE ATMOSPHERIC AIR HUMIDITY MEASUREMENT METHODS

V. M. Kartashov, S. I. Babkin, S. V. Pashchenko  
*Kharkov National University of Radio Electronics*  
 14, Lenin Ave., Kharkov, 61166, Ukraine  
 Ph.: +38-057-702-1587; email: res@kture.kharkov.ua

*Abstract*—This paper suggests double-frequency phase remote atmospheric air humidity measurement methods which can offer an alternative for amplitude methods. Certain small distinctions in sound velocities under condition of dispersion can be discovered by measuring the difference of phases between Doppler change frequencies of accepted signals frequencies.

### I. Introduction

At present, the study of possibility of remote atmospheric air humidity measurement methods based on acoustic waves is rather theoretic than experimental stage. This thesis focuses on the analysis of remote atmospheric air humidity measurement methods based on acoustic relaxation phenomenon in humid atmospheric air, the assessment of atmospheric phenomena and equipment impact on measurement error as well as the search of ways of this error decline.

### II. Main Part

The phase method of measuring the air humidity by dual-frequency radio-acoustic sounding is based on connection between the relaxation frequency for the atmospheric air with its humidity and velocity of sound of random frequency in the atmosphere with relaxation processes in it [1]. In case of instrumental error of phase shift measurement  $\delta(\Delta\varphi) = 1^\circ$ , the overall instrumental error of the relative air humidity measurement by this method is evaluated as (3-5)%. For experimental assessment of potential use of the double-frequency phase method for remote air humidity measurement an integrated radio-electronic atmospheric value monitoring system, comprising a single-frequency RAS system (operating frequency 440 MHz) and a double-frequency sodar (operating frequencies 1 kHz and 4 kHz), was used [2]. All recorded mean values of the phase shifts are quite in keeping with the calculated data given in the research work. Such experimental results enabled to set forward a phase method for remote measuring the air humidity, different from the double-frequency RAS. This method contemplates double-frequency AS for phase measurements and single-frequency for RAS – for frequency measurements (to determine humidity measurement altitude and air temperature at such altitude) [3], and a device, implementing this method, may be designed basing on the research work].

### III. Conclusion

Theoretical and experimental studies of the possibility to use acoustic waves for remote atmospheric air humidity measurement have proved that small differences of sound velocities under condition of dispersion can be discovered by measuring the difference of phases between Doppler change frequencies of accepted signals frequencies.