



Е.О. Арискин, Д.Л. Люлин, В.М. Солдаткин

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕКТОРА ВЕТРА НА БОРТУ ВОЗДУШНОГО СУДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

(Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н.Туполева-КАИ)

Задача контроля скоростей, углов направления и других параметров воздушных потоков актуальна в метеорологии и расходомерии, авиации и энергетике, экологии и других областях [1-5]. Это определяет непрерывное повышение требований к их техническим характеристикам: диапазонам измерения, надёжности, чувствительности, быстродействию и др. В ряде случаев этим требованиям не всегда удовлетворяют приборы, основанные на использовании традиционных методов измерения: тепловой, тахометрический, аэродинамический и вихревой [2-5]. Весьма перспективным при решении ряда задач может оказаться ультразвуковой метод [2,6], имеющий ряд преимуществ: не вносит аэродинамических возмущений в контролируемый воздушный поток, обладает повышенной надёжностью из-за отсутствия подвижных элементов, чисто электронная цепь измерительного преобразования и обработки сигналов, низкое энергопотребление. Это определяет целесообразность анализа особенностей реализации и технических возможностей ультразвукового метода применительно к задаче контроля параметров воздушных потоков.

Ультразвуковой метод основан на использовании для целей измерения скорости распространения акустических колебаний в воздушной среде от скорости и направления ее движения относительно траектории распространения ультразвуковой волны.

Рассмотрим особенности реализации ультразвукового метода измерения расхода [6]. В этом случае измерение расхода сводится к измерению разности времени излучения и приема ультразвуковых сигналов, разности фаз или разности частот излучаемых и принимаемых сигналов.

Если в контролируемом воздушном потоке разместить два совмещенных излучателя – приемника ультразвуковых колебаний, каждый из которых поочередно работает в режиме излучения и приема, то время прохождения звукового колебания в направлении потока будет определяться соотношением  $t_1 = \frac{L}{a + V}$ , где  $L$  – расстояние между приемником и излучателем;  $a$  – скорость звука в воздухе;  $V$  – скорость движения воздушного потока.

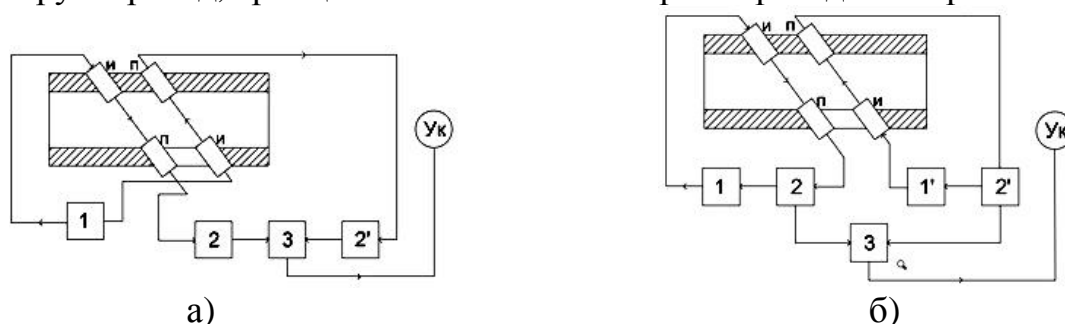
При движении ультразвуковых колебаний встречно воздушному потоку, время прохождения звука будет равно  $t_1 = \frac{L}{a - V}$ . Тогда контролируемая ско-



рость  $V$  будет определяться выражением вида  $V = \frac{t_2 - t_1}{2La^2}$ .

При этом интервал времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ , по которому определяется скорость  $V$ , будет равен  $\Delta t = 2LV/a^2$  и определяет выбор конструктивных параметров при реализации ультразвукового измерителя скорости воздушных потоков по времени прохождений ультразвуковых колебаний от излучателя до приемника. Например, при  $L=0,1$  м,  $a=340,3$  м/с и  $V=10$  м/с, интервал времени  $\Delta t = 1,7 \cdot 10^{-5}$  с. Измерение таких интервалов времени является непростой технической задачей, что ограничивает применение таких время – импульсных ультразвуковых измерителей. Как видно из выражения (2), выходной сигнал время – импульсных ультразвуковых измерителей зависит от температуры  $T$  контролируемого воздушного потока, так как скорость звука  $a = \sqrt{kgRT}$ , где  $k$  – показатель адиабаты воздуха;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – газовая постоянная.

Для оценки возможностей ультразвукового метода при контроле разности фаз рассмотрим двухконтурную схему ультразвукового фазового расходомера воздуха через трубопровод, принципиальная схема которого приведена на рис. 1 а [6].



1-генератор; 2, 2' – усилители;  
 3 – фазометр; Ук – указатель;  
 И, П – излучатель и приемник.

1, 1' – генераторы; 2, 2' – усилители;  
 3 – смеситель; Ук – указатель;  
 И, П – излучатель и приемник.

Рис. 1 – Принципиальные схемы фазового (а) и частотного (б) ультразвуковых расходомеров

Для ультразвуковых сигналов, направленных по потоку и против него, интенсивности звуковых колебаний  $J_1$  и  $J_2$  будут определяться соотношениями  $J_1 = \omega L(a + V \cos \theta)$ ;  $J_2 = \omega L(a - V \cos \theta)$ ; где  $\theta$  – угол наклона луча траектории распространения ультразвуковых колебаний по отношению к оси трубопровода.

Тогда разность фаз, измеряемая фазометром 3 (рис.1,а), будет определяться выражением  $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\omega LV \cos \theta}{a^2}$ .

Для оценки возможностей фазового ультразвукового расходомера определим разность фаз при  $L=0,1$  м,  $V=10$  м/с,  $a=340,3$  м/с,  $\theta=45^\circ$ ,  $\omega=2\pi f$ ,  $f=2 \cdot 10^4$  Гц. Подставляя численные значения, получим  $\Delta \varphi = 5,7$  рад, что достаточно просто измеряется фазометром. Однако, как видно из выражения (3), выходной сигнал фазовых ультразвуковых измерителей также зависит от температуры контролируемого воздушного потока.



Для оценки возможностей ультразвукового метода при реализации частотного расходомера, рассмотрим схему, приведенную на рис. 1,б.

В частотном расходомере время распространения звука от излучателя И к приемнику П по потоку и против него соответственно будут определяться как  $t_1=L(a+V\cos\theta)$ ;  $t_2=L(a-V\cos\theta)$ ;

Значениям времени  $t_1$  и  $t_2$  соответствуют частоты повторения импульсов  $f_1=1/t_1$ ,  $f_2=1/t_2$ . Разность частот, получаемая на выходе смесителя З (рис. 1,б), будет определяться соотношением  $\Delta f = \frac{2V \cos \theta}{L}$ . При параметрах расходомера

$L=0,1$  м,  $\theta=45^\circ$ , получим  $\Delta f=104$  Гц, причем выходной частотный сигнал не зависит от скорости звука и, следовательно, от температуры воздушного потока, что является достоинством частотных ультразвуковых измерителей.

Рассмотрим примеры реализации ультразвукового метода для контроля параметров пространственных воздушных потоков. Характерным примером использования ультразвукового метода для контроля параметров вектора ветра является автоматическая метеостанция АМК – 03[7]. Основным элементом метеостанции является ультразвуковой анемометр, внешний вид, акустическая и структурная схемы которого показаны на рис. 2.

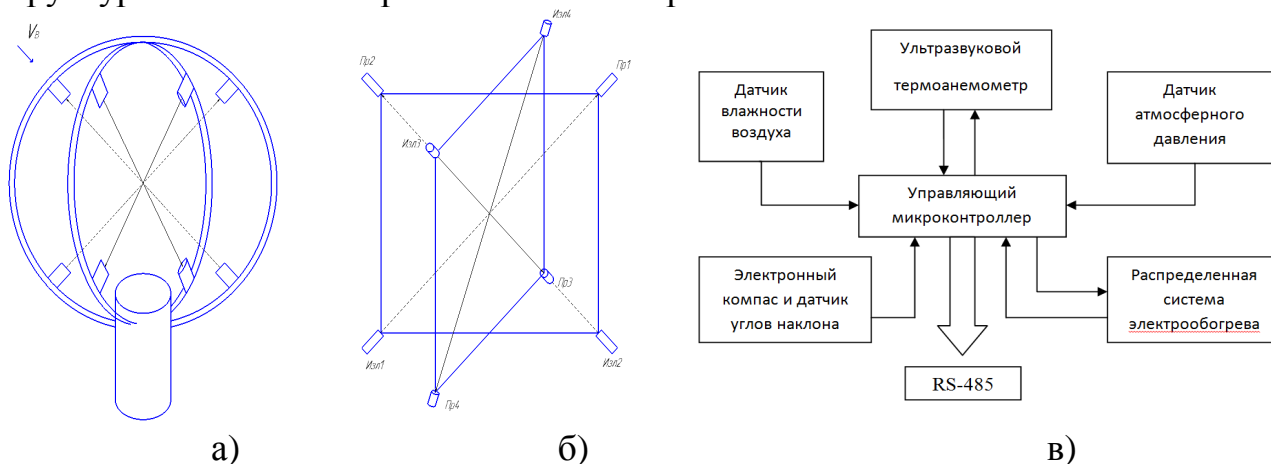


Рис. 2 – Ультразвуковой анемометр автоматической метеостанции АМК – 03: внешний вид (а); расположение приемников и излучателей (б); структурная схема системы (в)

Ультразвуковой анемометр (рис. 2, а) представляет собой сферическую конструкцию, выполненную в виде двух ортогональных трубчатых колец. На трубчатых кольцах закреплены восемь ультразвуковых пьезокерамических преобразователей, образующих четыре пары излучателей Изл. и приемников Пр. (рис 2, б), которые располагаются в противоположных вершинах куба, охватываемого сферической конструкцией, на одинаковом расстоянии  $L_i=L$  друг от друга. Такая конструкция обладает повышенной механической жесткостью в сочетании с хорошей «ветровой прозрачностью» и устойчивостью к воздействию ударных и вибрационных нагрузок.

Ультразвуковой анемометр работает по частотно – импульсной схеме с несущей звуковой частотой близкой к 100 кГц. Частота выдачи данных измере-



ний может изменяться и составляет 10, 40 или 80 Гц. Линейный размер пространственной области ультразвуковых измерений  $L_i=150$  мм, чувствительность по скорости ветра  $10^{-2}$  м/с, масса  $\approx 1,4$  кг, потребляемая мощность не более 1Вт от сети постоянного тока напряжением 10...30В.

Основные метрологические характеристики автоматической метеостанции сведены в таблицу [7].

Таблица – Основные технические характеристики автоматической метеостанции АМК – 03

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Погрешность
Температура воздуха, $T$ , °С	-50...+55	$\pm 0,3$ при $T \leq +30^\circ\text{C}$ ; $\pm 0,5$ при $T > +30^\circ\text{C}$
Скорость горизонтального ветра $V$ , м/с	0...40	$\pm(0,1 + 0,02V)$
Направление горизонтального ветра $D$ , град	0...360	$\pm 4$
Скорость вертикального ветра $\omega$ , м/с	-15...+15	$\pm(0,1 + 0,02\omega)$

Рассмотренные особенности работы и приведенный пример реализации системы измерения вектора ветра свидетельствуют о широких технических возможностях и областях применения ультразвукового метода, определяют перспективы его реализации в бортовых средствах измерения составляющих вектора ветра и вектора истинной воздушной скорости и связанных с ними параметров.

### Литература

- [1] Богомолов В.Ю., Богушевич А.Я., Гордов Е.П. и др. *Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза опасных метеорологических явлений* // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т.24. №1. С.52-59.
- [2] Кремлевский П.П. *Расходомеры и счетчики количества*: Л.: Машиностроение, 1975. 776 с.
- [3] Петунин А.Н. *Методы и техника измерения параметров газовых потоков*: М.: Машиностроение, 1972. 332 с.
- [4] Горлин С.М. *Экспериментальная аэромеханика*. М: Высшая школа, 1970. 423 с.
- [5] Солдаткин В.М. *Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов*. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.
- [6] Боднер В.А. *Приборы первичной информации*. М.: Машиностроение, 1981. 344 с.
- [7] Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Коблев А.А. и др. *Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации* // Датчики и системы. 2012. №3. С. 47-52