

**АКУСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ
ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ
И НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА
ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗА
С ИСКЛЮЧЕНИЕМ АППАРАТНЫХ
ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК**

В.А. Гайский, П.В. Гайский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины,
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

Предлагается и описывается новый способ измерения скорости и направления потока жидкости или газа и устройства для его реализации, обеспечивающие повышение точности за счет исключения аппаратных задержек акустических сигналов из результатов измерения.

Введение. Известны акустические способы измерения скорости и направления потока жидкости или газа и реализующие их устройства, основанные на использовании нескольких пар разнесенных в пространстве на измерительных базах излучателей – приемников акустических сигналов, организации встречного прохождения акустических сигналов по измерительным базам, определении скорости звука в среде и составляющих проекции вектора скорости потока на измерительные базы по разности времен прохождения акустических сигналов в разных направлениях [1 – 4].

Точность этих средств измерения ограничена влиянием на результат измерения аппаратной временной задержки сигналов в передающих и приемных трактах, включая задержки в акустических преобразователях, которые существенно зависят от температуры и давления, и изменяются со временем. Кроме того, в результат измерения входит скорость звука в среде, которую определяют с ограниченной точностью из-за тех же задержек сигналов в приемо-передающих трактах.

Известно устройство для измерения скорости течения, в котором для повышения точности путем независимого косвенного измерения скорости звука

и внесения поправок на времена задержек акустических сигналов в приемо-передающих трактах по градуировочным зависимостям задержек от температуры и давления, используют как измерители интервалов времени передачи акустических сигналов, так и измерители относительной электрической проводимости, температуры и гидростатического давления [5]. Это устройство содержит акустические излучатели – приемники, размещенные в пространстве, усилители на прием, преобразователи временных интервалов в код, генератор опорной частоты и микропроцессор, связанные между собой. Это устройство не обеспечивает необходимой точности измерения и требует сложных периодических градуировок.

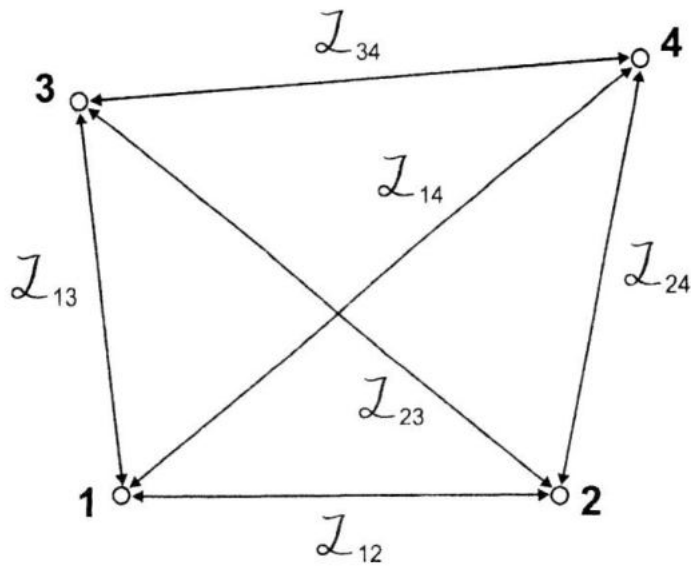
Постановка задачи. Стоит задача создания акустического способа измерения скорости и направления потока жидкости или газа, который обеспечивал бы исключение из результата измерения скорости звука и скорости потока аппаратных временных задержек в приемо-передающих трактах на акустических трассах.

Описание способа. Сущность предлагаемого способа состоит в следующем.

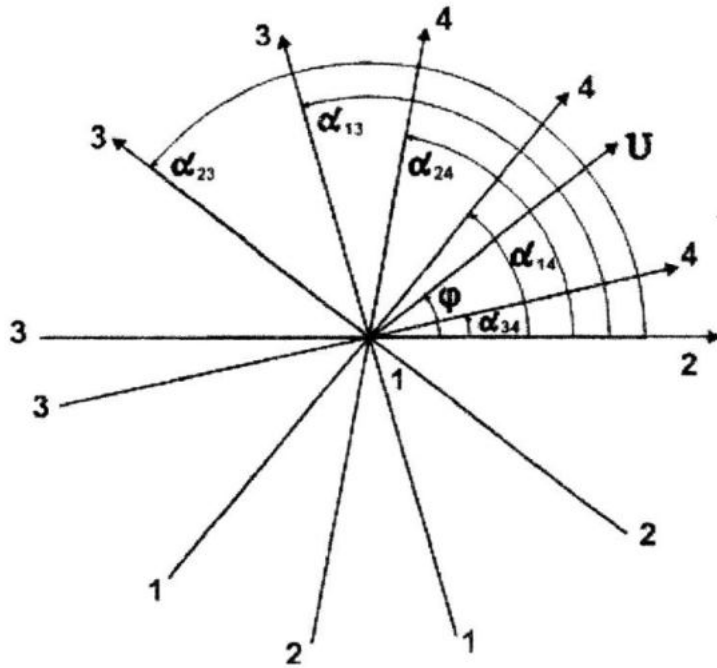
Четыре акустических излучателя-приемника размещают в вершинах неправильного четырехугольника, например, так, как это показано на рис. 1. Расстояния между вершинами образуют шесть баз, которые попарно не равны ($L_{ij} \neq L_{sk}$), $i, j, s, k \in \{1, 2, 3, 4\}$.

Излучатель-приемник содержит или один обратимый акустический преобразователь или два: один на передачу, другой на прием. Каждый излучатель имеет диаграмму направленности, в которой находятся три приемника.

Каждый i -ый излучатель посылает импульсно-модулированный сигнал на три приемника, и фиксируются времена τ_{ij} прохождения сигнала по трассам от i -го излучателя к j -ому приемнику, включающие времена задержек в приемо-передающих трактах: в излучателе – τ_{ui} , в приемнике – τ_{pj} .



Р и с. 1. Схема размещения акустических излучателей-приемников в вершинах неправильного четырехугольника в плоскости потока и схема акустических трасс



Р и с. 2. Схема формирования проекций вектора скорости на направления акустических трасс

Для фиксируемых времен прохождения сигналами двенадцати акустических трасс можем записать

$$\tau_{12} = \tau_{u1} + \tau_{n2} + \frac{L_{12}}{C+v_{12}} ;$$

$$\tau_{13} = \tau_{u1} + \tau_{n3} + \frac{L_{13}}{C+v_{13}} ;$$

$$\tau_{14} = \tau_{u1} + \tau_{n4} + \frac{L_{14}}{C+v_{14}} ;$$

$$\tau_{21} = \tau_{u2} + \tau_{n1} + \frac{L_{12}}{C - v_{14}};$$

$$\tau_{42} = \tau_{u4} + \tau_{n2} + \frac{L_{24}}{C - v_{24}};$$

$$\tau_{23} = \tau_{u2} + \tau_{n3} + \frac{L_{23}}{C + v_{23}};$$

$$\tau_{43} = \tau_{u4} + \tau_{n3} + \frac{L_{34}}{C - v_{34}};$$

$$\tau_{24} = \tau_{u2} + \tau_{n4} + \frac{L_{24}}{C + v_{24}}; \quad (1)$$

$$\tau_{31} = \tau_{u3} + \tau_{n1} + \frac{L_{13}}{C - v_{13}};$$

$$\tau_{32} = \tau_{u3} + \tau_{n2} + \frac{L_{23}}{C - v_{23}};$$

$$\tau_{41} = \tau_{u4} + \tau_{n1} + \frac{L_{14}}{C - v_{14}};$$

где $\tau_{u1}, \tau_{u2}, \tau_{u3}, \tau_{u4}$ – задержки излучателей; $\tau_{n1}, \tau_{n2}, \tau_{n3}, \tau_{n4}$ – задержки приемников; C – скорость звука в среде; v_{ij} – проекции вектора скорости потока на направление ij – й трассы, $i = \overline{1, 4}; j = \overline{1, 4}$.

Для исключения задержек в прямопередающих трактах проводим следующие сложения и вычитания уравнений системы (1)

$$T_1 = \tau_{14} - \tau_{12} + \tau_{32} - \tau_{34} = \frac{L_{14}}{C + v_{14}} - \frac{L_{12}}{C + v_{12}} + \frac{L_{23}}{C - v_{23}} - \frac{L_{34}}{C + v_{34}},$$

$$T_2 = \tau_{12} - \tau_{13} - \tau_{42} + \tau_{43} = \frac{L_{12}}{C + v_{12}} - \frac{L_{13}}{C + v_{13}} - \frac{L_{24}}{C - v_{24}} + \frac{L_{34}}{C - v_{34}}, \quad (2)$$

$$T_3 = \tau_{23} - \tau_{21} + \tau_{41} - \tau_{43} = \frac{L_{23}}{C + v_{23}} - \frac{L_{12}}{C - v_{12}} + \frac{L_{14}}{C - v_{14}} - \frac{L_{34}}{C - v_{34}},$$

$$T_4 = \tau_{21} - \tau_{24} - \tau_{31} + \tau_{34} = \frac{L_{12}}{C - v_{12}} - \frac{L_{24}}{C + v_{24}} - \frac{L_{13}}{C - v_{13}} + \frac{L_{34}}{C + v_{34}}.$$

Для определения скорости звука в среде проведем следующие преобразования

$$T_1 + T_3 = \left(\frac{L_{23}}{C - v_{23}} + \frac{L_{23}}{C + v_{23}} \right) - \left(\frac{L_{12}}{C + v_{12}} + \frac{L_{12}}{C - v_{12}} \right) + \left(\frac{L_{14}}{C + v_{14}} + \frac{L_{14}}{C - v_{14}} \right) - \left(\frac{L_{34}}{C + v_{34}} + \frac{L_{34}}{C - v_{34}} \right),$$

$$T_1 + T_3 = \frac{2L_{23}C}{C^2 - v_{23}^2} - \frac{2L_{12}C}{C^2 - v_{12}^2} + \frac{2L_{14}C}{C^2 - v_{14}^2} - \frac{2L_{34}C}{C^2 - v_{34}^2}.$$

Поскольку $C^2 \gg v_{ij}^2$, то v_{ij}^2 в последнем выражении можно пренебречь и записать

$$T_1 + T_3 \approx \frac{2}{C} (L_{23} - L_{12} + L_{14} - L_{34}),$$

откуда

$$C \approx \frac{2(L_{23} - L_{12} + L_{14} - L_{34})}{T_1 + T_3}. \quad (3)$$

Далее выразим проекции v_{ij} на направления акустических трасс вектора скорости потока, заданного в полярной

системе координат модулем v и углом φ . Примем, что направление трассы 12 соответствует $\varphi = 0$.

Исходя из схемы векторов на рис. 2, для проекций v_{ij} получим

$$\begin{aligned}
 v_{12} &= v \cos \varphi, \\
 v_{13} &= v \cos(\alpha_{13} - \varphi) = v (\cos \alpha_{13} \cos \varphi + \sin \alpha_{13} \sin \varphi), \\
 v_{14} &= v \cos(\alpha_{14} - \varphi) = v (\cos \alpha_{14} \cos \varphi + \sin \alpha_{14} \sin \varphi), \\
 v_{23} &= v \cos(\alpha_{23} - \varphi) = v (\cos \alpha_{23} \cos \varphi + \sin \alpha_{23} \sin \varphi), \\
 v_{24} &= v \cos(\alpha_{24} - \varphi) = v (\cos \alpha_{24} \cos \varphi + \sin \alpha_{24} \sin \varphi), \\
 v_{34} &= v \cos(\alpha_{34} - \varphi) = v (\cos \alpha_{34} \cos \varphi + \sin \alpha_{34} \sin \varphi).
 \end{aligned} \tag{4}$$

Из выражений (2) получим

$$\begin{aligned}
 \frac{(T_1 - T_3)C^2}{2} &= L_{12} v_{12} + L_{14} v_{14} - L_{23} v_{23} - L_{34} v_{34}, \\
 \frac{(T_2 - T_4)C^2}{2} &= L_{13} v_{13} - L_{12} v_{12} - L_{24} v_{24} + L_{34} v_{34}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Подставляя выражение v_{ij} из системы уравнений (4) в уравнения (5), получим

$$\begin{aligned}
 \frac{(T_1 - T_3)C^2}{2} &= L_{12} v \cos \varphi + L_{14} v (\cos \alpha_{14} \cos \varphi + \sin \alpha_{14} \sin \varphi) - L_{23} v (\cos \alpha_{23} \cos \varphi + \sin \alpha_{23} \sin \varphi) - \\
 &- L_{34} v (\cos \alpha_{34} \cos \varphi + \sin \alpha_{34} \sin \varphi) = \\
 &= v [\cos \varphi (L_{12} + L_{14} \cos \alpha_{14} - L_{23} \cos \alpha_{23} - L_{34} \cos \alpha_{34}) + \sin \varphi (L_{14} \sin \alpha_{14} - L_{23} \sin \alpha_{23} - L_{34} \sin \alpha_{34})],
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{(T_2 - T_4)C^2}{2} &= -L_{12} v \cos \varphi + L_{13} v (\cos \alpha_{13} \cos \varphi + \sin \alpha_{13} \sin \varphi) - L_{24} v (\cos \alpha_{24} \cos \varphi + \sin \alpha_{24} \sin \varphi) + \\
 &+ L_{34} v (\cos \alpha_{34} \cos \varphi + \sin \alpha_{34} \sin \varphi) = \\
 &= v [\cos \varphi (-L_{12} + L_{13} \cos \alpha_{13} - L_{24} \cos \alpha_{24} + L_{34} \cos \alpha_{34}) + \sin \varphi (L_{13} \sin \alpha_{13} - L_{24} \sin \alpha_{24} - L_{34} \sin \alpha_{34})].
 \end{aligned} \tag{7}$$

Суммы в круглых скобках выражений (6) и (7) являются конструктивными константами, которые обозначим

$$\begin{aligned}
 A_1 &= L_{12} + L_{14} \cos \alpha_{14} - L_{23} \cos \alpha_{23} - L_{34} \cos \alpha_{34}, \\
 B_1 &= L_{14} \sin \alpha_{14} - L_{23} \sin \alpha_{23} - L_{34} \sin \alpha_{34}, \\
 A_2 &= -L_{12} + L_{13} \cos \alpha_{13} - L_{24} \cos \alpha_{24} + L_{34} \cos \alpha_{34},
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$B_2 = L_{13} \sin \alpha_{13} - L_{24} \sin \alpha_{24} + L_{34} \sin \alpha_{34}.$$

Выражения (6) и (7) приводятся к виду

$$\frac{(T_1 - T_3)C^2}{2} = v(A_1 \cos \varphi - B_1 \sin \varphi), \quad (9)$$

$$\frac{(T_2 - T_4)C^2}{2} = v(A_2 \cos \varphi - B_2 \sin \varphi). \quad (10)$$

Введем обозначение

$$\frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_4} = \frac{A_1 \cos \varphi + B_1 \sin \varphi}{A_2 \cos \varphi + B_2 \sin \varphi} = p. \quad (11)$$

Проведем преобразования

$$A_1 \cos \varphi - p A_2 \cos \varphi = p B_2 \sin \varphi - B_1 \sin \varphi,$$

$$(A_1 - p A_2) \cos \varphi = (p B_2 - B_1) \sin \varphi,$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 - p A_2}{p B_2 - B_1}, \text{ окончательно получим}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{A_1 - p A_2}{p B_2 - B_1}. \quad (12)$$

Зная C из выражения (3) и φ из выражения (12), определяем скорость потока по выражению (9)

$$v_1 = \frac{(T_1 - T_3)C^2}{2(A_1 \cos \varphi + B_1 \sin \varphi)}, \quad (13)$$

и (или) по выражению (10)

$$v_2 = \frac{(T_2 - T_4)C^2}{2(A_2 \cos \varphi + B_2 \sin \varphi)}. \quad (14)$$

Целесообразно за конечный результат принять среднюю величину

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (15)$$

Таким образом, изложенный акустический способ измерения скорости потока жидкостей и газов обеспечивает независимость результата измерения от задержек сигналов в трактах излучения и приема, что повышает точность измерений и (или) позволяет уменьшить размеры измерительных баз.

Возможны различные варианты реализации способа.

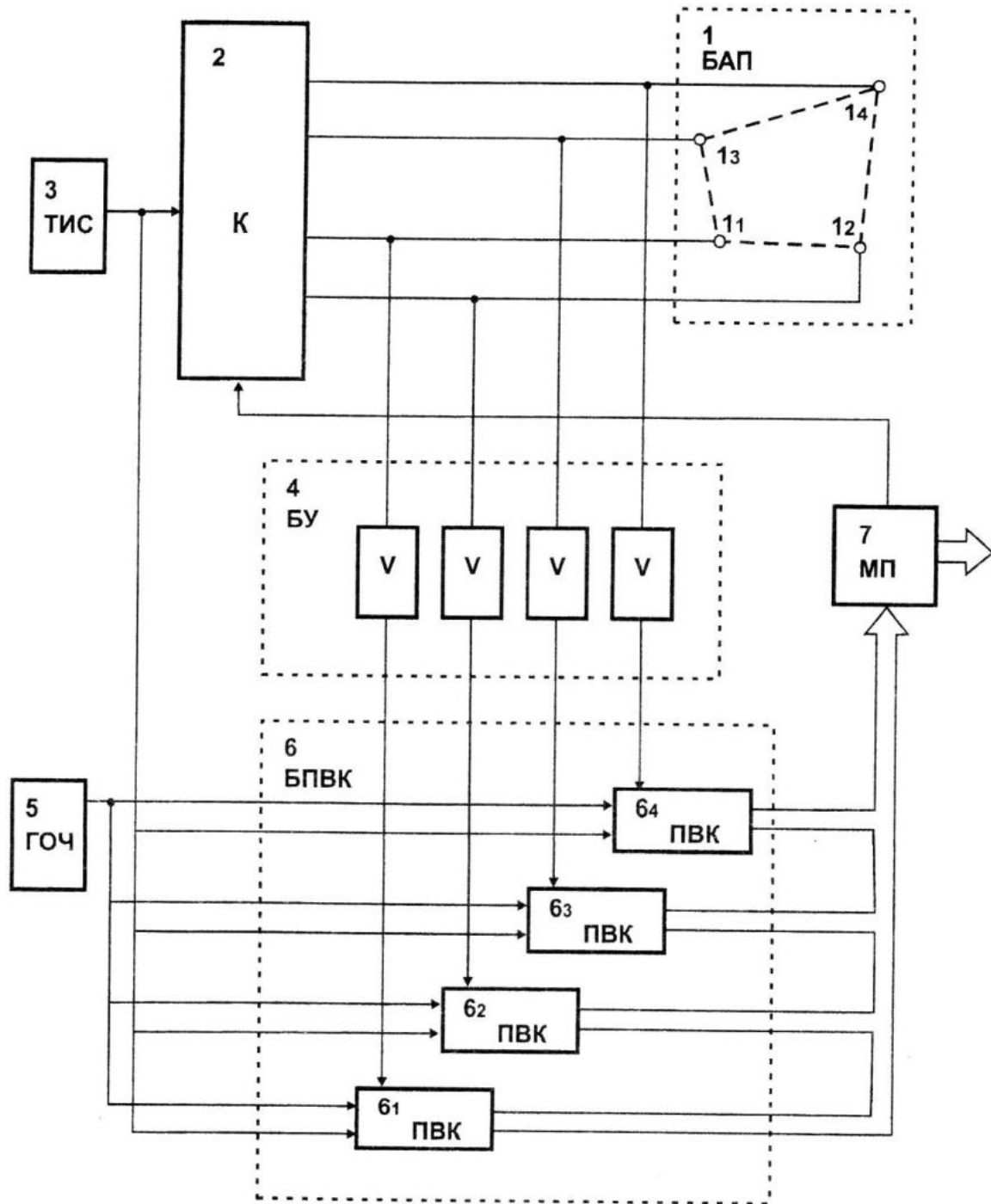
На рис. 3 представлена структурная схема первого варианта измерителя скорости и направления потока с импульсными акустическими сигналами и параллельными каналами преобразования временных интервалов в код. На рис. 4 представлена структурная схема второго варианта измерителя скорости и направления потока с импульсными акустическими сигналами и преобразователем временных интервалов на базе микропроцессора.

Первый вариант устройства содержит блок из четырех акустических преобразователей (излучателей-приемников) 1 (БАП), коммутатор 2 (К), генератор импульсных сигналов 3 (ГИС), блок усилителей на прием 4 (БУ), генератор опорной частоты 5 (ГОЧ), блок преобразователей временных интервалов в код 6 (БПВК) и процессор 7 (МП).

Блок 1 состоит из четырех акустических преобразователей, размещенных в вершинах неправильного четырехугольника на плоскости, блок 4 состоит из четырех параллельных усилителей на прием, блок 6 состоит из четырех параллельных преобразователей временных интервалов в код.

Электрические входы акустических преобразователей блока 1 соединены с выходами коммутатора 2, на вход которого подан выход генератора импульсных сигналов 3 и адрес – вход которого соединен с выходом микропроцессора 7.

Выход генератора опорной частоты 5 подан на входы опорной частоты преобразователей временных интервалов в код блока 6.

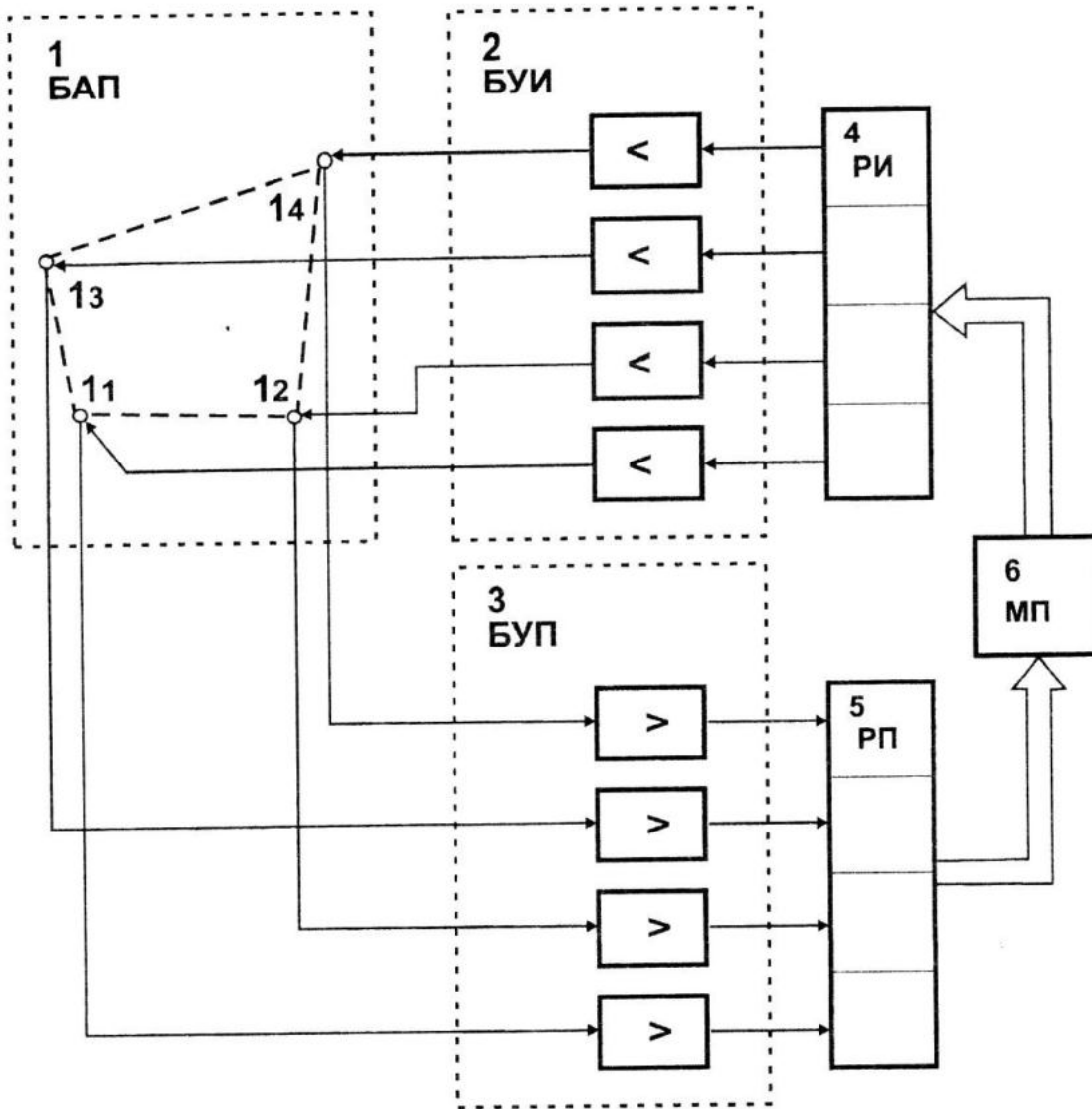


Р и с. 3. Структурная схема первого варианта измерителя скорости и направления потока с импульсными акустическими сигналами и параллельными каналами преобразования временных интервалов в код

Электрические выходы акустических преобразователей поданы на усилители импульсных сигналов блока 4, выходы которых соединены с входами стоповых сигналов преобразователей временных интервалов в код блока 6, входы старто-

вых сигналов которых соединены с выходом генератора импульсных сигналов 3.

Выходы преобразователей блока 6 поданы на цифровые входы микропроцессора 7.



Р и с. 4. Структурная схема второго варианта измерителя скорости и направления потока с импульсными акустическими сигналами и преобразователем временных интервалов на базе микропроцессора

Блок акустических преобразователей 1 характеризуется конструктивными параметрами A_1, B_1, A_2, B_2 , которые из геометрических размеров схемы расположения преобразователей вычисляются по формулам (7).

Устройство работает следующим образом. Генератор импульсных сигналов 3 вырабатывает сигнал запуска акустического преобразователя, который коммутатором 2 по команде микропроцессора 7 адресуется i -ому акустическому преобразователю, излучающему акусти-

ческий сигнал в потоке в направлении трех других акустических преобразователей. Одновременно этот сигнал является стартовым для всех преобразователей временных интервалов в код блока 6.

Сигнал запуска проходит передающий тракт i -го излучателя за время τ_{ui} , базовое расстояние в потоке за время

$$\frac{L_{ij}}{C \pm v_{ij}},$$

и усилитель за время τ_{pi} и в качестве стопового сигнала поступает на входы

преобразователей временных интервалов τ_{ij} в код. В каждом такте акустический сигнал воспринимается тремя акустическими преобразователями, проходит три канала усиления на три преобразователя время-код.

Код временных интервалов τ_{ij} поступает на микропроцессор.

Цикл измерения содержит четыре такта и дает 12 отсчетов

τ_{ij} , $i=\overline{1,4}$; $j=\overline{1,4}$; при $i \neq j$, соответствующих системе уравнений (1).

Далее угол φ между направлением скорости потока и лучом от акустического преобразователя 1_1 к акустическому преобразователю 1_2 определяется микропроцессором по выражению (11) с использованием выражений (2), (4), (11).

Скорость потока определяется по выражению (15) с использованием выражений (2), (3), (13) и (15).

Второй вариант устройства, реализующего акустический способ измерения скорости и направления потока, структурная схема которого представлена на рис. 4, целесообразен при использовании высокопроизводительного микропроцессора, способного выполнить функции преобразования временных интервалов в код и необходимые вычислительные операции.

В состав устройства входят блок акустических преобразователей 1 (БАП), блок усилителей излучателей 2 (БУИ), блок усилителей приемников 3 (БУП), регистр излучения 4 (РИ), регистр приема 5 (РП) и микропроцессор 6 (МП).

Регистр излучения 4 имеет четыре разряда, каждый разряд по выходу соединен с входом одного из усилителей излучателей 2.

Регистр излучения 4 предназначен для селекции одного из четырех акустических преобразователей на передачу появлением сигнала «1» в соответствующем разряде регистра.

Регистр приема 5 служит для фиксации прихода сигнала в соответствующем канале установкой сигнала «1» в соответствующем разряде.

Отрезок времени между появлением «1» в i -ом разряде РИ и появлением «1»

в j -ом разряде РП соответствует фиксируемому значению τ_{ij} .

Устройство работает следующим образом. В каждом такте микропроцессор устанавливает на РИ код со значением «1» в i -ом разряде. При этом i -ый акустический преобразователь посылает импульсный сигнал на три других акустических преобразователя.

Принятые ими сигналы через усилители БУП в разное время поступают на входы j -ых разрядов ($j = \overline{1,4}$, $i \neq j$) РП и устанавливают в них значение «1».

Микропроцессор 6 преобразует в код и фиксирует временные интервалы τ_{ij} .

Эти значения далее используются для вычисления скорости звука, направления и скорости течения аналогично вышеизложенному.

Заключение. Предложен способ измерения скорости и направления потока жидкости или газа [6], обеспечивающий повышение точности за счет исключения аппаратных задержек сигналов из результатов измерения с использованием разнесенных в пространстве акустических излучателей-приемников, включающий излучение и прием акустических сигналов, фиксацию времен прохождения сигналов на акустических трассах и вычисление скорости звука и составляющих вектора скорости потока в заданной системе координат, размещением акустических излучателей-приемников по одному в вершинах неправильного четырехугольника, лежащего в плоскости потока, таким образом, чтобы в диаграмме направленности каждого из них находились три других, облучением каждым излучателем одновременно трех приемников, фиксацией двенадцати времен прохождения сигналами акустических трасс, включающих пары приемо-передающих трактов и измерительные базы в потоке между излучателем и приемником, вычислением угла φ между направлением вектора скорости потока и осью абсцисс в приборной системе координат, скорости звука в среде C и модуля вектора скорости потока v по выражениям

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{A_1 - p A_2}{p B_2 - B_1}, \quad (16)$$

$$C = \frac{2(L_{12} - L_{14} - L_{23} + L_{34})}{T_1 + T_3}, \quad (17)$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}, \quad (18)$$

$$\text{где } v_1 = \frac{(T_1 - T_3)C^2}{2(A_1 \cos \varphi + B_1 \sin \varphi)}; \quad (19)$$

$$v_2 = \frac{(T_2 - T_4)C^2}{2(A_2 \cos \varphi + B_2 \sin \varphi)}; \quad (20)$$

$$A_1 = L_{12} + L_{14} \cos \alpha_{14} - L_{23} \cos \alpha_{23} - L_{34} \cos \alpha_{34};$$

$$B_1 = L_{14} \sin \alpha_{14} - L_{23} \sin \alpha_{23} - L_{34} \sin \alpha_{34}; \quad (21)$$

$$A_2 = -L_{12} + L_{13} \cos \alpha_{13} - L_{24} \cos \alpha_{24} + L_{34} \cos \alpha_{34};$$

$$B_2 = L_{13} \sin \alpha_{13} - L_{24} \sin \alpha_{24} + L_{34} \sin \alpha_{34}.$$

$$T_1 = \tau_{12} - \tau_{14} - \tau_{32} + \tau_{34};$$

$$T_2 = \tau_{12} - \tau_{13} - \tau_{42} + \tau_{43}; \quad (22)$$

$$T_3 = \tau_{21} - \tau_{23} - \tau_{41} + \tau_{43};$$

$$T_4 = \tau_{21} - \tau_{24} - \tau_{31} + \tau_{34};$$

$$p = \frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_4};$$

где τ_{ij} – время прохождения сигнала по трассе i -го излучателя и j -го приемника, $i = \overline{1, 4}$; $j = \overline{1, 4}$; α_{ij} – угол между направлением трассы от i -го излучателя к j -ому приемнику и осью абсцисс, совпадающей по направлению с 12 -ой трассой; L_{ij} – длина измерительной базы ij – трассы в среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабий В.И., Гайский В.А., Ерошкова А.А., Запезалов А.С., Шапова

лов Ю.И. Создание позиционных измерительных комплексов // Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. Еремеева В.Н. – Севастополь: МГИ НАН Украины. 2004. – С. 657 – 660.

2. Гайский П.В. Создание алгоритмически-программного обеспечения первичной обработки измерительной информации // Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. Еремеева В.Н. – Севастополь: МГИ НАН Украины. 2004. – С. 661 – 662.

3. Гайский В.А., Забурдаев В.И. Создание служб и средств метрологического обеспечения // Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. Еремеева В.Н. – Севастополь: МГИ НАН Украины. 2004. – С. 664.

4. Гайский В.А. Основные результаты // Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. Еремеева В.Н. – Севастополь: МГИ НАН Украины. 2004. – С. 665–675.

5. Гайский В.А., Греков Н.А., Трофименко В.А. Состояние разработки гидрологических измерительных комплексов, создаваемых для оснащения сети гидрометеорологических станций Украины в рамках Государственной Программы «МЕТЕО». Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей // Тезисы докладов Международной научной конференции (Крым, Донузлав, 13 – 16 сентября 2005 г.) – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2005. – С. 167.

6. Патент России № 2333499. Акустический способ измерения скорости и направления потока жидкости или газа и устройство (его варианты) для его осуществления. Гайский В.А., Гайский П.В., Греков Н.А. – Оpubл. 10.09.2008. Бюл. № 25.