

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ НАПРАВЛЕННОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗА

В.А. Гайский, П.В. Гайский

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

Предлагается спектральный метод измерения скорости направленного потока с использованием первичного измерительного преобразователя меток в потоке с определенной измерительной базой и с определенным частот, на которых функция спектральной плотности сигнала меток имеет минимумы.

Известны корреляционные методы измерения скорости потока, основанные на оценке времени переноса меток (неоднородностей и (или) взвеси) потоком на расстояние между двумя фиксированными точками по максимуму корреляционной функции [1].

Недостатком корреляционных методов измерения скорости потока являются трудности технической реализации точечных датчиков меток с высоким быстродействием

Известны спектральные методы измерения скорости потока в точке по доплеровскому сдвигу частоты отраженного от меток акустического сигнала [2].

Недостатком доплеровских методов измерения скорости потока является зависимость результата измерения от скорости звука в среде, что ограничивает точность измерения.

$$R(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \theta(x, t) dx = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \theta(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \Pi_{\tau}(t) \theta(t) dt, \quad (2)$$

где $\Pi_{\tau}(t)$ – прямоугольная функция, равная 1 на интервале $(t - \tau, t)$, и нулю вне этого интервала.

$$\tau = LV_{\alpha}^{-1}, \quad (3)$$

В операторной форме

$$R(p) = H(p)\theta(p) = \frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau} \exp(-j\pi f \tau) \theta(p). \quad (4)$$

В качестве меток используются пространственные неоднородности температуры, скорости, пульсации давления, коэффициента теплообмена датчика со средой, плотности среды, электропроводимости, концентрации различных растворенных веществ и взвешенных частиц.

Ставится задача повышения точности, упрощения технической реализации и расширения областей применения метода измерения скорости потока.

Суть предлагаемого метода измерения скорости потока состоит в следующем.

Используется свойство распределенного первичного измерительного преобразователя выполнять скользящее осреднение во времени переносимых вдоль него потоком пространственных неоднородностей измеряемой величины (меток). Распределенная измерительная база (РИБ) первичного измерительного преобразователя меток размещается в потоке под углом α к направлению вектора скорости \vec{V} ($0 \leq \alpha < 90^\circ$). При этом скорость меток в потоке вдоль измерительной базы V_{α} составит

$$V_{\alpha} = V \cos^{-1} \alpha. \quad (1)$$

Пространственное распределение меток $\theta(x)$ переносится вдоль измерительной базы со скоростью V_{α} , осредняется на базе L и преобразуется во временной сигнал $R(t)$ на выходе первичного измерительного преобразователя в соответствии с уравнением свертки

Первичный измерительный преобразователь меток с равномерно распределенной базой является звеном скользя-

щего среднего на интервале времени τ , квадрат модуля амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) которого равен

$$|H(2\pi f)|^2 = \left| \frac{\sin 2\pi f \tau}{2\pi f \tau} \right|^2 = \left| \frac{\sin 2\pi f L V_\alpha^{-1}}{2\pi f L V_\alpha^{-1}} \right|^2. \quad (5)$$

Модуль АЧХ $|H(f)|^2$ имеет нули на частотах $f_i = \frac{L}{2\tau}$ с интервалом $\Delta f_i = f_i - f_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots, n$ причем

$$2\Delta f_i \tau = 2(\Delta f)_i L V_\alpha^{-1}. \quad (6)$$

Отсюда

$$V_i = V_\alpha \cos \alpha = 2(\Delta f)_i L \cos \alpha = 2L(f_i - f_{i-1}) \cos \alpha. \quad (7)$$

Для идентификации $|H(f)|^2$ и определения f_i входной для первичного измерительного преобразователя сигнал меток $\theta(t)$ должен иметь спектр $S_\theta(f)$, покрывающий одну или несколько полос $(f_i - f_{i-1})$. Для этого перед первичным измерительным преобразователем в потоке устанавливают специальный турбулизатор.

Независимо от спектра $S_\theta(f)$, спектр выходного сигнала $S_R(f)$ будет иметь нули на тех же частотах f_i , что и $|H(f)|^2$. Поскольку идентификация Δf потребует некоторого времени T , то значение скорости переноса меток V_α вдоль измерительной базы за это время не будет постоянным и вместо нулей $|H(2\pi f)|^2$ будут иметь место локальные минимумы, соответствующие которым частоты f_i следует определять при анализе функции спектральной плотности $S_R(f)$ выходного сигнала первичного измерительного преобразователя $R(t)$, причем

$$S_R(2\pi f) = |H(2\pi f)|^2 S_\theta(2\pi f). \quad (8)$$

В этом общем случае Δf_i будут случайными величинами, и целесообразно

взять их среднее значение по выражению

$$\overline{\Delta f_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{i-1}), \quad (9)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Для средней скорости потока, учитывая выражения 1 и 7, получим

$$\overline{V_T} = \frac{2L \cos \alpha}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{i-1}) \quad (10)$$

Диапазон измеряемых скоростей $V_{\max} - V_{\min}$ определяет диапазон возможных частот в одном окне

$$\begin{aligned} (f_{i_{\max}} - f_{i_{\min}}) &= \\ &= (V_{\alpha_{\max}} - V_{\alpha_{\min}}) L^{-1} = \\ &= (V_{\max} - V_{\min}) \cos^{-1} \alpha L^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

Как видно из последнего выражения широкополосность входного для ПИП сигнала $\theta(t)$ можно обеспечить за счет установки угла α , при $\alpha \rightarrow 90^\circ$ получим $(f_{i_{\max}} - f_{i_{\min}}) \rightarrow \infty$.

Поскольку разрешение по частоте $df = T^{-1}$, то для заданного числа уровней N по измеряемой скорости можем записать

$$N = (f_{1\max} - f_{1\min}) T^{-1}, \quad (12)$$

Для необходимого времени измерения получим

$$T = \frac{N}{(f_{1\max} - f_{1\min})}. \quad (13)$$

Из выражения (12) видно, что с увеличением $\Delta f \rightarrow \infty$ получим $T \rightarrow 0$. Из выражений (7) и (10) видно, что в принципе, для определения скорости потока достаточно определить ширину любого одного из n частотного окна $\Delta f_i = f_i - f_{i-1}$.

Типовые пространственные спектры основных параметров водных сред в спадающей части хорошо аппроксимируются степенными законами вида $|k|^{-m}$, где показатель m принимает значения от 1 до 5, т.е. являются бесконечными [3, 4]. При переносе меток потоком относительно первичного измерительного преобразователя эти пространственные спектры будут трансформироваться в частотные спектры, также бесконечные. Бесконтактные первичные измерительные преобразователи, использующие

излучения могут быть сделаны почти безинерционными. Следовательно, для повышения быстродействия измерения скорости потока предлагаемым способом нет принципиальных ограничений, кроме чувствительности и быстродействия электроники обрамления первичного измерительного преобразователя.

Для иллюстрации параметров метода измерения скорости потока рассмотрим численные примеры.

Типичный диапазон измеряемых скоростей течений природных вод составляет $(0,02 \div 5) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Зададимся требуемым разрешением по скорости 1% ($N=100$), примем угол наклона распределенной измерительной базы к направлению вектора скорости потока $\alpha = 45^\circ$ и определим первый частотный диапазон $(f_{1\max} - f_{1\min})$ (выражение 7), ширину частотного окна Δf и необходимое время измерения в первом частотном диапазоне ($n = 1$) (выражение 11) при использовании возможных измерительных баз различной длины L . Результаты представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристики метода при измерении типовых скоростей водных потоков

L , м	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,1	0,5	1,0
$f_{1\max}$, гц	714	357	238	179	143	71,4	14,3	7,14
$f_{1\min}$, гц	2,86	1,43	0,95	0,715	0,572	0,286	0,057	0,029
Δf , гц	714	357	238	178	142	71,4	14,2	7,1
T , с	0,14	0,3	0,4	0,56	0,7	1,4	7,04	14,08

Рассмотрим второй пример для скорости ветра. Типичный диапазон измеряемых скоростей ветра составляет $(1,2 \div 60) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

При принятых $N=100$ и $\alpha = 0^\circ$, частотные диапазоны $f_{1\max}$, $f_{1\min}$, Δf и необходимое время измерения T при использовании измерительных баз различной длины L представлены в табл. 2.

Характеристики метода при измерении типовых скоростей ветра

L , м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0	3,0
$f_{1\max}$, Гц	600	300	200	150	120	60	30	20
$f_{1\min}$, Гц	12	6	4	3	2,4	1,2	0,6	0,4
Δf , Гц	598	294	196	147	118	59	30	20
T , с	0,17	0,340	0,51	0,68	0,85	1,7	3,3	5

Рассматривая данные таблиц 1 и 2 как базовые и варьируя α , $\cos \alpha$ и устанавливая n для изменения частот ($f_{i\max} - f_{i\min}$) можно выбрать приемлемую техническую реализацию метода для конкретного применения.

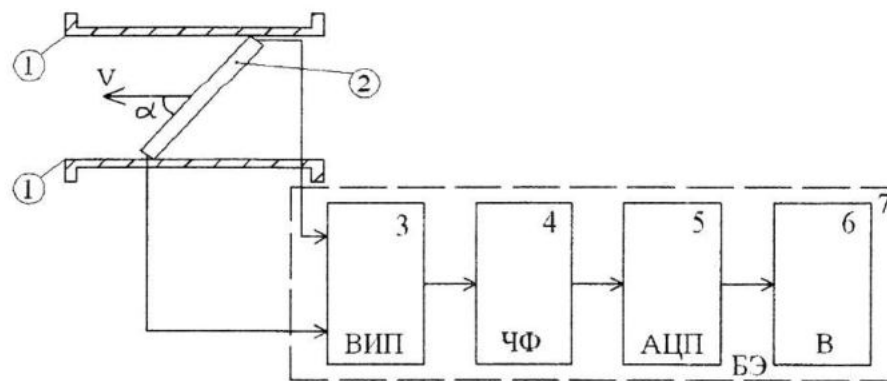
Вычисление функции спектральной плотности $S_R(f)$ должно выполняться в рабочей полосе частот ($f_{i\max} - f_{i\min}$), где $i = 1, 2, \dots, n$ для конкретной измерительной базы и диапазона измеряемых скоростей потока.

Если первичный измерительный преобразователь имеет модуль $|G(2\pi f)|$ передаточной функции $G(p)$, то вместо выражения 5 следует использовать

$$|H_1(2\pi f)|^2 = \left| \frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau} \cdot G(2\pi f) \right|^2 \quad (14)$$

При монотонно спадающей $G(2\pi f)$, что характерно для всех инерционных преобразователей, положение минимумов функций $|H_1(2\pi f)|^2$ и $|H(2\pi f)|^2$ и не изменится и, следовательно, частоты f_i останутся прежними.

Обобщенная структурная схема типичного устройства для реализации рассмотренного метода измерения скорости направленного потока представлена на рис. 1.



Р и с. 1. Обобщенная структурная схема типичного устройства для реализации спектрального метода измерения скорости потока

В состав устройства входят: ограждение 1 первичного измерительного преобразователя (ПИП) 2 с распределенной базой, вторичный измерительный преобразователь (ВИП) 3, частотный фильтр (ЧФ) 4, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 5 и вычислитель (В) 6. Ограждение 1 служит для фиксации на-

правления потока и размещения измерительной базы ПИП 2 в потоке под заданным углом α к направлению вектора скорости.

Контактный ПИП 2 преобразует среднее значение сигнала меток на распределенной измерительной базе в электрический сигнал. В бесконтактном

ПИП 2 производится модуляция метками потока информативного параметра луча какого-либо излучения, например, оптического или акустического.

Бесконтактный ПИП 2 содержит источник и приемник излучения, которые могут быть совмещены при использовании отраженного сигнала.

Вторичный измерительный преобразователь 3 преобразует информативный параметр сигнала ПИП 2 в сигнал, удобный для фильтрации частотным полосовым или нижних частот фильтром ЧФ 4 и, если это необходимо, дальнейшего аналого-цифрового преобразования АЦП 5.

При использовании фильтра нижних частот его частота среза должна быть вблизи $f_{i_{\max}}$ справа, при использовании полосового фильтра – несколько шире полосы $f_i - f_{i-1}$. Частота дискретизации f_0 АЦП должна удовлетворять неравенству $f_0 > 2f_{i_{\max}}$ или $f_0 > 2n\Delta f$. Выбор значения $n \geq 1$ производят из наличия спектральных составляющих сигнала меток в потоке в рабочей полосе частот. Вычислитель 6 служит для определения функции спектральной плотности $S_R(2\pi f)$ и частот f_i , $i = 1, 2, \dots, n$. В устройстве может быть использован в качестве В6 аналоговый спектроанализатор для вычисления $S_R(f)$, в этом случае АЦП 5 отсутствует.

При использовании цифрового спектроанализатора в качестве В6 на него может быть возложена часть задачи полосовой фильтрации сигнала $R(t)$. Все узлы электроники 3 – 6 совместно образуют блок электроники (БЭ) 7, который входит в состав всех устройств, осуществляющих изложенный спектральный способ измерения скорости потока.

Работа типичного устройства состоит в скользящем осреднении сигнала меток на распределенной измерительной базе, вычислении функции спектральной плотности сигнала с выхода первичного измерительного преобразователя, определения частот f_i , на которых эта функция имеет минимум, и вычислении средней скорости потока по формуле 10.

Заключение. Предложен метод измерения скорости направленного потока, состоящий в том, что используют первичный измерительный преобразователь меток в потоке с равномерно распределенной измерительной базой длиной L

(контактный или бесконтактный), размещают измерительную базу в потоке под известным углом α ($0 \leq \alpha < 90^\circ$) к направлению потока, подают выходной сигнал $R(t)$ первичного измерительного преобразователя через вторичный измерительный преобразователь на спектроанализатор, вычисляя известным способом текущую за время T функцию спектральной плотности сигнала $S_R(f)$, определяют частоты f_i , на которых функция $S_R(f_i)$ имеет минимумы, нумеруют частоты f_i в порядке возрастания от $f_0 = 0$ до $i = 1, 2, \dots, n$, вычисляют среднюю за время T скорость потока $\overline{V_T}$ по формуле

$$\overline{V_T} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n L(f_i - f_{i-1}) \cos \alpha \quad (15)$$

Повышение точности измерений обусловлено привязкой результата измерений к расстоянию и времени (частоте).

Общим достоинством всех таких устройств является простота аппаратной реализации в обмен на относительную сложность обработки измерительных сигналов, которая просто реализуема на современном уровне техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ланге Ф. Корреляционная электроника: Основы и применение корреляционного анализа в современной технике связи, измерений и регулирования. – Л.: Госсудпромиздат, 1969. – 342 с.
2. Мясников В.И. Измерение расхода и объема воды. Мир измерений. – 2001. – № 3, 4. – С. 4 – 9.
3. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применения. – М.: «Наука», 1965. – 465 с.
4. Хинце И.О. Турбулентность. М.– Л.: Физматгиз, 1063. – 680 с.
5. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х томах. Пер. с франц. – М.: «Мир», 1983. – Т. 1. – 312 с.
6. Петухов Б.С. Опытное изучение процессов теплопередачи. ГЭИ., М.– Л. – 1952. – 344 с.
7. Дерюгин К.К., Степанюк И.А. Морская гидрометрия. – Л.: Гидрометеопиздат, 1974. – 285 с.