

К 20-летию кафедры ИЗОС

УДК 681.2:574

К. Е. Кассациер, Т. И. Кошечева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Анализ погрешностей ультразвукового доплеровского профилографа при измерении скорости течений

Проводится анализ погрешностей измерения течений с помощью ультразвуковых доплеровских профилографов. Рассматриваются ошибки измерения, вызываемые погрешностями определения частоты отраженного сигнала, качеством работы измерителей качки и точностью определения скорости звука в воде.

Измеритель течения, доплеровский измеритель, погрешность измерения

В настоящее время ультразвуковые доплеровские измерители скорости течений широко используются при проведении экологического мониторинга акваторий морей, рек и других водоемов, при подготовке материалов экологических экспертиз и сопровождении различных видов хозяйственной деятельности на акваториях, применяются в качестве судовых лагов и во многих других случаях. Измерители основаны на использовании эффекта Доплера, в соответствии с которым происходит изменение частоты звукового сигнала при его отражении от движущегося объекта. В реальном водоеме всегда есть взвешенные частицы, которые перемещаются со скоростью течения. Измеряя доплеровский сдвиг отраженных от этих частиц ультразвуковых сигналов, можно определить скорость течения. Доплеровские измерители имеют ряд существенных преимуществ перед другими известными типами измерителей скорости течений. Они позволяют проводить высокоточные дистанционные измерения вектора скорости течения в реальном масштабе времени бесконтактным методом, а также обеспечивают одновременные измерения течений на различных глубинах в слоях воды фиксированной толщины, что дает возможность строить зависимости скорости течения от глубины – профили скоростей течений. За приборами рассматриваемого типа закрепилось название «ADCP-профилографы» (Acoustic Doppler Current Profile). ADCP-профилографы позволяют проводить измерения как при стационарной установке прибора, так и при размещении его на движущемся судне.

В настоящее время в РФ ADCP-профилографы серийно не производятся. Использование импортных измерителей затрудняется тем, что в РФ отсутствуют методы проведения метрологической аттестации и поверки рассматриваемых приборов. Непонятно, насколько основные характеристики импортных ADCP-профилографов, приводимые в рекламных проспектах фирм-изготовителей, соответствуют реальным условиям эксплуатации. В настоящей статье проводится анализ погрешностей измерения ADCP-профилографов.

Типовой ADCP-профилограф снабжен 4 антеннами, расположенными в углах квадрата. Направления излучения этих антенн составляют с нормалью к плоскости расположения антенн угол A . Профилограф измеряет скорости течения воды вдоль направлений излучения антенн в заданных слоях воды. Таким образом, для каждого слоя получается четыре значения скорости v_i , $i = 1-4$ – номер излучающей антенны. Эти значения скоростей используются при вычислении составляющих вектора скорости течения в координатах, связанных с прибором.

Обозначим через (x, y, z) декартовы координаты, связанные с профилографом. Оси x, y располагаются в горизонтальной плоскости, ось x проходит в направлении от антенны № 3 к антенне № 1, а ось y – в направлении от антенны № 4 к антенне № 2. При размещении профилографа на судне ось x направляется параллельно диаметральной плоскости в направлении к носу судна. Ось z направлена вертикально вверх.

На рис. 1 представлено сечение в вертикальной плоскости xOz . Направления v_1 и v_3 соответствуют направлениям лучей зондирования антенн № 1 и 3 соответственно, u_x и u_z – проекции скорости течения на оси x и z .

В соответствии с эффектом Доплера скорость течения в направлении луча зондирования может быть представлена в следующем виде:

$$v = \frac{1}{2} c \frac{F - F_0}{F_0}, \quad (1)$$

где c – скорость звука в воде; F – частота сигнала в отраженном импульсе; F_0 – частота излучения профилографа.

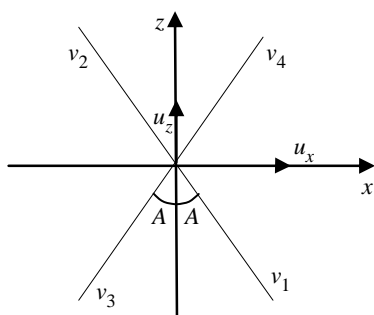


Рис. 1

В формуле (1) за положительное направление скорости течения вдоль луча зондирования принимается скорость течения в направлении к антенне.

Проекция вектора скорости течения на направления лучей зондирования будут равны

$$\begin{aligned} v_1 &= -u_x \sin A + u_z \cos A, \\ v_3 &= u_x \sin A + u_z \cos A, \\ v_2 &= -u_y \sin A + u_z \cos A, \\ v_4 &= u_y \sin A + u_z \cos A. \end{aligned} \quad (2)$$

Из уравнений (1), (2) получаем значения составляющих вектора скорости течения в координатах (x, y, z) :

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{v_3 - v_1}{2 \sin A} = \frac{c}{4 \sin A \cdot F_0} (F_3 - F_1), \\ u_y &= \frac{v_4 - v_2}{2 \sin A} = \frac{c}{4 \sin A \cdot F_0} (F_4 - F_2), \\ u_z &= \frac{\sum_{i=1}^4 v_i}{4 \cos A} = \frac{c}{8 \cos A \cdot F_0} \sum_{i=1}^4 F_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Из выражений (3) следует, что погрешность определения составляющих вектора скорости течения определяется погрешностью измерения принятой частоты и точностью задания скорости звука c .

Рассмотрим погрешности, связанные с измерением частоты принимаемого сигнала. Ошибки измерения принимаемой частоты для импульсов, излучаемых разными антеннами, можно считать независимыми случайными величинами с одинаковой дисперсией. В этих условиях из выражений (3) можно получить значения СКО измерения составляющих вектора скорости течения в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{u_x} &= \sigma_{u_y} = \frac{c}{2\sqrt{2} \cdot \sin A \cdot F_0} \sigma_F, \\ \sigma_{u_z} &= \frac{c}{4 \cos A \cdot F_0} \sigma_F, \end{aligned} \quad (4)$$

где σ_{u_x} , σ_{u_y} , σ_{u_z} – СКО соответствующих составляющих вектора скорости течения; σ_F – СКО ошибки измерения частоты принимаемого сигнала.

Величина σ_F определяется временем наблюдения отраженного импульса τ и отношением сигнал/шум в приемном тракте профилографа. Профилограф содержит специальный блок, определяющий отношение сигнал/шум в принимаемом импульсе. Если значение этого соотношения недостаточно велико, измерения в данном импульсе не проводятся. Таким образом исключается влияние отношения сигнал/шум на погрешность измерения. Отношение «хороших» (good) импульсов к общему числу зондирующих импульсов в процентах может быть выведен на табло.

Используя соотношения размерности для σ_F , можно записать:

$$\sigma_F = \frac{k}{\tau}, \quad (5)$$

где k – безразмерный коэффициент.

В свою очередь,

$$\tau = \frac{L}{c} = \frac{h}{c} \cos A, \quad (6)$$

где L – расстояние вдоль луча, по которому усредняется скорость течения; h – задаваемая оператором толщина слоя усреднения.

Подставляя (6) в (5), получим:

$$\sigma_F = \frac{kc \cos A}{h}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в выражения (4) и учитывая независимость ошибок измерения в последовательности излучаемых импульсов, получим значения СКО определения составляющих скорости:

$$\sigma_{u_x} = \sigma_{u_y} = \frac{kc^2 \text{ctg } A}{2\sqrt{2n} \cdot F_0 h}, \quad (8)$$

$$\sigma_{u_z} = \frac{kc^2}{4\sqrt{n} \cdot F_0 h},$$

где n – число импульсов, по которым проведено определение вектора скорости течения.

Таким образом, СКО измерения скорости течения оказывается обратно пропорциональным рабочей частоте профилографа, толщине слоя усреднения и квадратному корню из числа «хороших» импульсов в посылке.

Для определения безразмерного коэффициента k в формулах (8) необходимы экспериментальные измерения.

В материалах фирмы «Teledyne RD Instrument» (см. таблицу) приводятся данные по величине СКО на один импульс для профилографов с частотами работы 1200, 600 и 300 кГц для разных значений толщины слоя усреднения [1].

Толщина слоя усреднения, м	Частота, кГц		
	1200	600	300
	h/F_0 , мм/с		
0.25	140	–	–
0.5	70	140	–
1	36	70	140
2	18	36	70
4	–	18	36
8	–	–	18

Приборы, представленные в таблице, имеют угол раствора антенн $A = 22^\circ$.

Принимая скорость звука равной 1500 м/с, можно в соответствии с данными таблицы оценить значение безразмерного коэффициента k в формулах (8). Расчеты дают значение $k = 0.02$.

В технических характеристиках и рекламных проспектах фирм-изготовителей ADCP-профилографов приводятся данные по точности измерения без указания толщины слоя усреднения и используемого числа зондирующих импульсов на одно измерение. Так, например, для профилографов FlowQuest фирмы «LinkQuest Inc.» указано абсолютное значение точности (accuracy) измерения скорости, равное 5 мм/с для профилографов с частотами 75, 150 и 300 кГц, и 2.5 мм/с для частот 600, 1000 и 2000 кГц.

Если под точностью понимать СКО измерения, то при полученном выше значении $k = 0.02$ такая точность может быть достигнута при максимально возможных для данного профилографа значениях толщины слоя усреднения и числа зон-

дирований на одно измерение. В этом случае для большинства профилографов время одного измерения будет превышать 4 мин.

Из выражений (3) следует, что относительная погрешность в определении скорости течения определяется погрешностью в определении скорости звука.

Скорость звука в морской воде определяется значениями температуры, солености и давления:

$$c = f(t, S, p). \quad (9)$$

Эта функция в соответствии с таблицами ГСССД 202–02, утвержденными Госстандартом, может быть вычислена по нижеприведенным полиномам [2].

Входными данными для расчета служат:

- температура (t), °С;
- соленость (S), ‰;
- гидростатическое давление (p), МПа.

Расчет скорости звука производится по формуле

$$c = A + Bp + Cp^2 + Dp^3,$$

где c – скорость звука, м/с;

$$A = a_1 + a_2 S + a_3 S^{3/2} + a_4 S^2,$$

$$B = b_1 + b_2 S + b_3 S^2,$$

$$C = c_1 + c_2 S, \quad D = d_1 + d_2 S,$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, d_1, d_2$ – коэффициенты расчета скорости звука, определяемые по формулам

$$a_1 = 1402.3874 + 5.0383617 \cdot t -$$

$$- 5.8117292 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 +$$

$$+ 3.3463882 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 1.4825967 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 +$$

$$+ 3.1658502 \cdot 10^{-9} \cdot t^5,$$

$$a_2 = 1.391098228 - 1.2998507 \cdot 10^{-2} \cdot t +$$

$$+ 1.25843366 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 4.9459941 \cdot 10^{-7} \cdot t^3,$$

$$a_3 = -1.9755249 \cdot 10^{-2} - 1.1412619 \cdot 10^{-4} \cdot t +$$

$$+ 4.02435713 \cdot 10^{-6} \cdot t^2,$$

$$a_4 = 1.7058269 \cdot 10^{-3} + 1.54245467 \cdot 10^{-5} \cdot t -$$

$$- 6.6810333 \cdot 10^{-7} \cdot t^2,$$

$$b_1 = 1.4994347 + 8.1039755 \cdot 10^{-3} \cdot t -$$

$$- 1.1169791 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 +$$

$$+ 1.72922898 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 7.6999585 \cdot 10^{-9} \cdot t^4,$$

$$b_2 = 3.0944321 \cdot 10^{-3} - 1.8902101 \cdot 10^{-4} \cdot t +$$

$$\begin{aligned}
 &+ 3.82065283 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 3.6174469 \cdot 10^{-8} \cdot t^3, \\
 b_3 &= -9.5720141 \cdot 10^{-6} + 1.04551722 \cdot 10^{-6} \cdot t - \\
 &- 4.2767723 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 6.62068325 \cdot 10^{-10} \cdot t^3, \\
 c_1 &= 3.969523 \cdot 10^{-3} - 2.0048177 \cdot 10^{-4} \cdot t + \\
 &+ 3.2856051 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 3.340451345 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + \\
 &+ 1.37256278 \cdot 10^{-10} \cdot t^{-4}, \\
 c_2 &= -4.9583140 \cdot 10^{-5} + 1.67823060 \cdot 10^{-6} \cdot t - \\
 &- 1.4579402 \cdot 10^{-8} \cdot t^2, \\
 d_1 &= -1.5235495 \cdot 10^{-5} + 6.6311236 \cdot 10^{-7} \cdot t - \\
 &- 1.0555834 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 1.0503105 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 - \\
 &- 4.5780857 \cdot 10^{-13} \cdot t^4, \\
 d_2 &= 2.31706232 \cdot 10^{-7} - 8.0557016 \cdot 10^{-9} \cdot t + \\
 &+ 7.7763909 \cdot 10^{-11} \cdot t^2.
 \end{aligned}$$

Анализ приведенных зависимостей проведем в следующих диапазонах изменения t, S, p :

$$\begin{aligned}
 -2 < t < 35 \text{ }^\circ\text{C}, \quad 33.1 < S < 36.6 \text{ } \%, \\
 0.1 < p < 6 \text{ МПа}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Этот интервал охватывает более 95 % объема вод Мирового океана на глубинах, доступных для измерения течений современными профилографами.

Среднеквадратическая ошибка расчета скорости звука по формулам (9) в диапазоне значений (10) не превышает 0.1 см/с.

Расчет значений частных производных скорости звука показал, что в диапазоне (10), производные положительны.

Таким образом, в рассматриваемом диапазоне экстремальные значения скорости звука достигаются на границах диапазона.

Максимальная скорость звука $c_{\max} = 1566.9$ м/с достигается при $t = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $S = 36.6 \text{ } \%$, $p = 6$ МПа; минимальная $c_{\min} = 1437.7$ м/с – при $t = -2 \text{ }^\circ\text{C}$, $S = 33.1 \text{ } \%$, $p = 0.1$ МПа. Значение разности $c_{\max} - c_{\min} = 129.6$ м/с.

Если в качестве значения скорости принимать постоянную величину

$$\frac{c_{\max} + c_{\min}}{2} = 1502.1 \text{ м/с},$$

то максимальная возможная погрешность в значении скорости звука будет равна

$$\Delta = \pm 64.8 \text{ м/с}.$$

Таким образом, при установке фиксированного значения скорости звука максимальная относи-

тельная погрешность измерения скорости течения не будет превышать 4.3 %.

Для уменьшения этой погрешности в состав большинства профилографов включен датчик температуры, позволяющий рассчитывать скорость звука по фактической температуре воды и заданным вручную значениям солёности.

Расчеты показали, что максимальная возможная погрешность в значении скорости звука при известной температуре воды и фиксированных значениях солёности и давления будет равна:

$$\Delta|_t = \pm 7.13 \text{ м/с}.$$

Максимальная относительная погрешность при этом не будет превышать 0.5 %.

Скорость звука в океане зависит от глубины. Доплеровский сдвиг частоты возникает при приеме и передаче сигналов, т. е. при перемещении антенны и отражателя относительно окружающей воды.

При одновременном движении антенны и отражателя доплеровский сдвиг, измеряемый профилографом, складывается из сдвигов, формируемых у антенны и отражателя. В соответствии с (1) можно записать:

$$F - F_0 = \Delta F = \Delta F_1 + \Delta F_2 = 2F_0 \left(\frac{u_1}{c_1} + \frac{u_2}{c_2} \right), \tag{11}$$

где ΔF_1 и ΔF_2 – доплеровские сдвиги, формируемые у антенны и отражателя; u_1 и u_2 – проекции скорости антенны и отражателя на направление луча профилографа; c_1 и c_2 – скорости звука в воде у антенны и отражателя.

С учетом выражения (11) интересующая нас скорость течения может быть представлена в виде

$$u_2 = \lambda \left(\frac{\Delta F}{2F_0} c_1 + u_1 \right),$$

где $\lambda = c_2/c_1$.

В соответствии с приведенными ранее данными о вычислении скорости звука

$$0.9 < \lambda < 1.1,$$

т. е. даже при точном значении скорости звука c_1 в районе профилографа ошибка в измерении течения на глубинных горизонтах может достигать 10 %. Для уменьшения этой погрешности необходимо иметь вертикальный разрез скорости звука в районе проведения измерений.

Установленный на судне профилограф подвержен влиянию качки. Крен судна приводит к повороту профилографа относительно оси x , дифферент – к повороту относительно оси y .

С учетом дифферента на угол φ уравнения (2) для составляющих скоростей течения на направления лучей v_1 и v_2 запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} v_1 &= -u_x \sin(A + \varphi) + u_z \cos(A + \varphi), \\ v_3 &= u_x \sin(A - \varphi) + u_z \cos(A - \varphi). \end{aligned} \quad (12)$$

И, следовательно, горизонтальная составляющая скорости u_x может быть представлена в виде

$$u_x = \frac{v_1 \cos(A - \varphi) - v_3 \cos(A + \varphi)}{\sin 2A}.$$

Профилографы имеют встроенные датчики углов крена и дифферента, что позволяет вычислять горизонтальные и вертикальные составляющие скорости течения с учетом качки. Погрешности измерения углов приводят к соответствующим погрешностям в определении скоростей течений.

Для нахождения этих погрешностей определим

$$\frac{du_x}{d\varphi} = \frac{v_1 \sin(A - \varphi) + v_3 \sin(A + \varphi)}{\sin 2A}. \quad (13)$$

Предполагая малость углов качки, выражение (13) можно привести к виду

$$du_x = \left[\frac{v_1 + v_3}{2 \cos A} - \frac{v_1 - v_3}{2 \sin A} \varphi \right] d\varphi.$$

Учитывая выражения (3), можно представить погрешность измерения горизонтальной составляющей скорости течения u_x в виде

$$du_x = u_z d\varphi - u_x \varphi d\varphi. \quad (14)$$

Аналогичное выражение может быть записано и для составляющей u_y :

$$du_y = u_z d\psi - u_y \psi d\psi, \quad (15)$$

где ψ – угол крена.

Как правило, профилографы работают при углах качки, не превышающих $15^\circ = 0.26$ рад, погрешности измерения углов $\pm 0.5^\circ < 0.01$ рад.

В этом случае погрешности, определяемые первыми членами уравнений (14)–(15), не превышают 1 % от вертикальной составляющей скорости u_z , а вторые члены уравнений не превышают 0.26 % от измеряемой составляющей.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что погрешности измерения скорости течений доплеровским профилографом существенно зависят от используемых параметров вертикального и временного усреднения. Приводимые в проспектах фирм-изготовителей профилографов данные по точности измерения теоретически могут достигаться только при использовании максимально допустимых для профилографа толщин слоев усреднения и времени одного измерения не менее 4 мин (для профилографов с частотой зондирования 1 Гц).

Методы повышения точности определения скорости звука в воде в месте установки профилографа, например при измерении температуры воды с помощью датчика, установленного в профилографе, не гарантируют соответствующего уменьшения погрешности определения скоростей течения. Для такого уменьшения необходимо знать скорость звука на горизонте измерения скорости течений.

Измерение углов качки с точностью не хуже $\pm 0.5^\circ$, как правило, гарантирует незначительное увеличение погрешности при измерении скорости течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Technical specifications. Workhorse Monitor Direct Reading 1200, 600, 300 kHz ADCP // A Teledyne RD Instruments Marine Measurements Datasheet. URL: www.rdinstruments.com (дата обращения: 24.04.14).

2. ГСССД 202–02 Морская вода. Скорость звука при соленостях 0–40 ‰, температурах 0...40 °С и из-

быточных давлениях 0...60 МПа. Св-во № 202 от 10.12.02. М.: Госстандарт России, 2002. 31 с.

3. Аракелян С. М., Ляхов Г. А., Чилингарян Ю. С. Нелинейная оптика жидких кристаллов. М.: Изд-во УФН, 1975. 262 с.

K. E. Kassatsier, T. I. Koshcheeva
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ERROR ANALYSIS OF THE ULTRASONIC DOPPLER PROFILER IN THE MEASUREMENT OF CURRENT VELOCITY

The analysis of currents of measurement errors with the help of Doppler ultrasound profiling is conducted. Measurement errors due to errors in determining the frequency of the reflected signal, the quality of work meters pitching and precision determining the speed of sound in water are considered.

Flow meter, Doppler meter, measurement error