

**ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ
ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
АКУСТИЧЕСКИМИ
ДОПЛЕРОВСКИМИ
ПРОФИЛОГРАФАМИ ТЕЧЕНИЙ**

*А.Н. Греков, Н.А. Греков,
Д.В. Степаненко*

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

В статье рассматриваются методы повышения точности определения величины слоя и его глубины залегания, в котором измеряются векторы скорости течения доплеровскими профилографами. Дана оценка методам акустического зондирования поля скорости звука и восстановления вертикальной структуры распределения скорости звука с использованием корреляционного приема отраженного сигнала от неоднородностей морской среды. Предложен метод повышения точности определения вертикального распределения скорости звука за счет исключения влияния вектора скорости течения на результат измерения профиля скорости звука.

При проведении океанологических исследований широкое применение получили акустические доплеровские измерители профиля векторов скоростей течения. Принцип действия таких измерителей, работающих в импульсном или непрерывном режиме, хорошо освещен в литературе [1, 2].

Из-за многих внешних факторов, влияющих на точность доплеровских профиломеров, проводить измерения этими приборами могут только высококвалифицированные специалисты. Для простых гидрологических условий и на небольших глубинах использование доплеровского измерителя течения упрощается, например, в США большая часть профилографов задействовано в измерении расхода воды в реках [3].

В современных конструкциях приборов используют пять акустических приемопередатчиков, четыре из которых

направлены под углом α к горизонту и пятый направлен вертикально вниз.

Для идеальных внешних условий фирма *RD Instruments* [4] приводит эмпирическую формулу расчета среднеквадратической погрешности измерения скорости течения σ_V

$$\sigma_V = \frac{1800 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{FH \sqrt{TNP}}, \quad (1)$$

где α – угол ориентации луча относительно горизонта; F – несущая частота зондирования, КГц; H – толщина выделенного слоя воды, м; T – время усреднения сигнала, с; N – число акустических лучей; P – частота повторения зондирующих импульсов, с⁻¹.

Однако, в формуле (1) отсутствует площадь пятна выделенного слоя, величина которого увеличивается с глубиной и эту площадь необходимо учитывать. Следовательно, профилограф измеряет среднюю скорость течения в пределах заданного слоя, с переменной площадью. Такое усреднение приводит к методической погрешности, выраженной в искажении результатов измерения скорости и направления течения в пределах одного слоя.

Поэтому, при проведении измерений профилографом необходимо оценивать несколько погрешностей каждого измеряемого параметра: скорости и направления течения, величину слоя и глубину залегания, в котором измерен вектор скорости течения.

В проспектах известных фирм, выпускающих профилографы, в основном указываются значения абсолютной и относительной погрешности измерения вектора скорости течения, но с какой погрешностью измеряются слои и на какой глубине они находятся, не уточняется и, поэтому, нет смысла точно измерять вектор скорости течения, если не определяется глубина его нахождения. Следовательно, исследователь, используя паспортную погрешность определения вектора скорости течения, может ошибочно измерить его совсем в другом

слое. И, как показывает практика, одной из важных характеристик при использовании профилографа является глубина слоя нахождения вектора скорости течения, которую можно определить, учитывая вертикальное распределение скорости звука в воде.

Рассмотрим более подробно этот вопрос. Методы, с помощью которых определяют распределение скорости звука в воде, подразделяют на прямые (контактные) и неконтактные. В нашем случае не будем рассматривать контактные методы измерения, которые основаны на использовании измерительных зондов из-за низкой производительности, и использование которых исключает необходимость применения доплеровских измерителей течений.

Воспользуемся разработанными методами дистанционного зондирования поля скорости звука в океане и восстановление вертикальной и горизонтальной структуры распределения скорости звука. Известные разработанные методы имеют свои достоинства и недостатки. Например, в некоторых разработанных методах необходимо иметь априорную информацию о распределении скорости звука, а это затрудняет оценку точности восстановления распределения скорости звука, так как априорная информация о профиле может быть получена из баз данных для определенного региона, а в некоторых базах могут быть большие отклонения от действительности.

Известны методы и устройства определения вертикального распределения скорости звука с помощью разнесенных акустических антенн.

Если, например, использовать вертикальный излучатель, или один из наклонных излучателей, которыми оборудованы многие доплеровские профилографы, и установить на определенном расстоянии от прибора минимум два дополнительных приемника, характеристика направленности которых определяется следующим выражением

$$\Phi(\alpha) = \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \Delta f \tau} \cos \pi f_0 \tau, \quad (2)$$

где $\tau = \frac{D \cos \alpha_0}{c_0}$ – запаздывание приня-

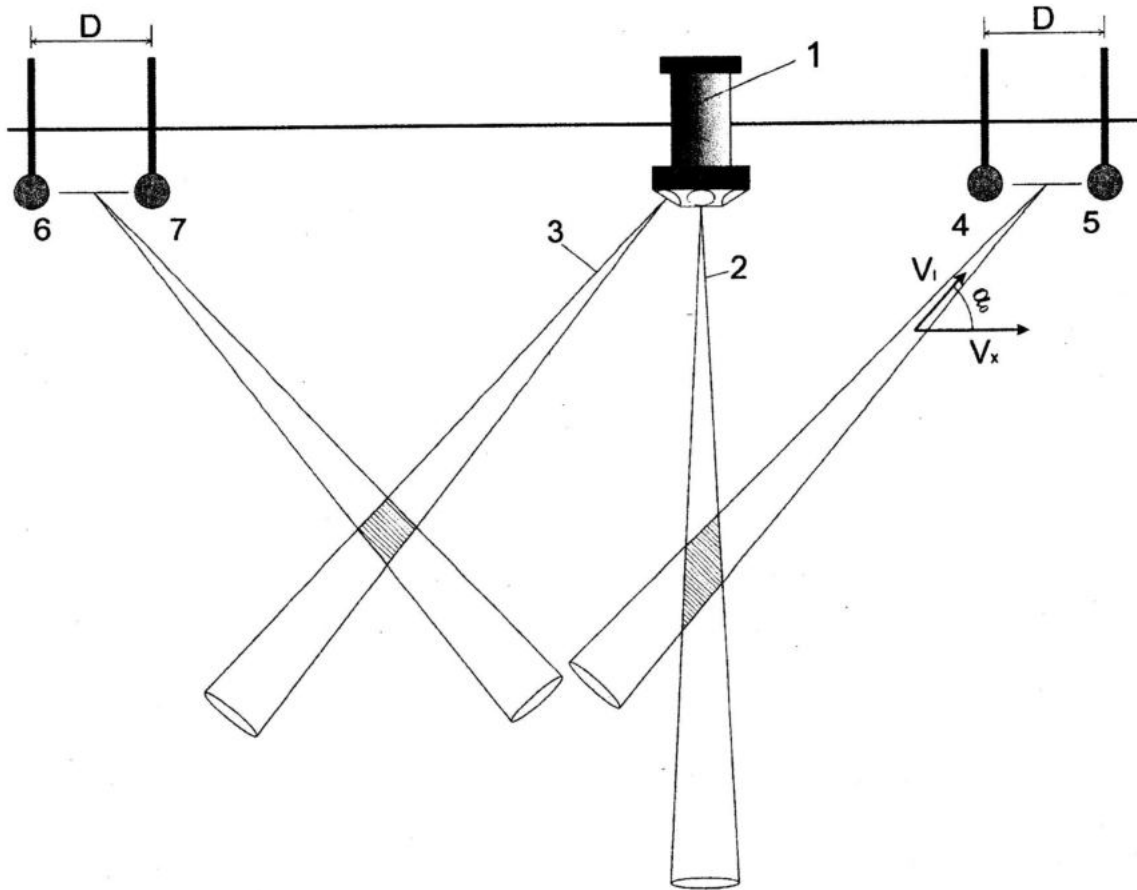
того сигнала относительно первого и второго акустического приемника; D – расстояние между акустическими приемниками; α_0 – угол прихода лучей рассеянного акустического сигнала; c_0 – скорость звука в жидкости на горизонте расположения приемопередающих антенн; f_0 – частота несущих колебаний.

Используя корреляционные приемники с перестраиваемыми линиями задержки, которые подключены к приемным антеннам, можно рассчитать изменения угла наклона направленности в зависимости от величины времени задержки t_{zi}

$$\alpha_{0i} = \arccos \frac{t_{zi} c_0}{D}. \quad (3)$$

По известным значениям расстояния D между углом прихода лучей α_i и измеренным соответствующим этим углам времени t_i определяют вертикальное распределение скоростей звука c_i на соответствующих горизонтах.

После излучения сигнала глубина распространения акустического импульса от вертикального или наклонного излучателя непрерывно увеличивается, соответственно увеличивается угол прихода лучей α_i принимаемого рассеянного акустического сигнала. На рис. 1 приведена предлагаемая структурно-функциональная схема измерителя профиля скорости звука и профиля вектора скорости течения: профилограф 1 с вертикальным 2 и наклонными 3 приемопередатчиками, корреляционная система для «прямоугольной схемы» с акустическими приемниками 4 и 5, корреляционная система для наклонной схемы с акустическими приемниками 6 и 7, расположенными на расстоянии D .



Р и с. 1. Структурно-функциональная схема измерителя профиля скорости звука и профиля скорости течения: V_x – горизонтальный вектор скорости течения, V_i – проекция вектора скорости течения на акустический луч

Для «прямоугольной схемы» зондирования скорость c_i в i -том слое можно определить итерационным методом из выражения [5]

$$\Delta t_i = \frac{c_0 D}{\left(c_i^2 \cos \alpha_0\right) \left(1 + \sqrt{1 - \frac{c_i \cos \alpha_0}{c_0}}\right)^2} \quad (4)$$

где c_0 – скорость звука на горизонте размещения антенных систем.

Воспользуемся соотношением для определения погрешности вычисления скорости звука c_i [6]

$$\frac{\Delta c_i}{c_i} \approx 2 \frac{\Delta t_i}{t_i} + \frac{\Delta \alpha_{0i}}{\cos \alpha_{0i}}, \quad (5)$$

где Δt_i и $\Delta \alpha_i$ – абсолютная погрешность определения времени t_i и угла α_{0i} соответственно.

Следовательно, погрешность вычисления скорости звука c_i зависит от погрешности определения времени t_i и угла наклона α_{0i} . В свою очередь, погрешность определения угла наклона α_{0i} зависит от точности определения величины скорости звука c_0 у акустических приемников.

Современные профилографы, оснащенные контактными измерительными каналами скорости звука, датчик которых размещен на корпусе прибора, его можно использовать для определения скорости звука c_0 для горизонта расположения приемных антенн.

Из всех имеющихся и рассмотренных измерительных каналов в акустических профилографах отсутствуют лишь два необходимых канала с акустическими корреляционными приемниками, разнесенными на расстоянии D , позволяющими определить вертикальное распределение скорости звука, используя описанную методику.

Рассмотренный способ определения вертикального распределения скорости звука имеет недостаток, заключающийся в том, что при вычислении скорости звука по трассе луча не учитывается проекция V_l горизонтальной скорости течения, которая вносит погрешность в измеренную скорость звука.

Используя электрический сигнал, снимаемый с разнесенных акустических приемников, можно определить профиль вертикального распределения вектора скорости течения с учетом эффекта Доплера

$$V_x = \frac{\Delta f c}{2 f_i \cos \alpha}. \quad (6)$$

Задаваясь необходимым шагом Δz по глубине z , последовательно определяем средние значения скорости звука в i -том слое. Определяем сумму проекций скорости течения V_l на соответствующий луч, используя уравнение (6) при $\cos \alpha = 0$, и вносим эту поправку в величину скорости звука c_i .

Таким образом, мы уменьшаем погрешность определения скорости звука, а, следовательно, повышаем точность вычисления глубины слоя, в котором определяются вектора скорости течения.

Предложенный метод по определению скорости звука позволяет повысить точность измерения профиля вектора скорости течения, однако, аппаратно требуется значительной доработки ADCP измерителей. Лучший эффект по точности несомненно даст применение вместо двух акустических приемников параметрических антенных решеток, которые должны располагаться вне корпуса профилографа на определенном расстоянии, возможно на жестком кронштейне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oceanography Applications and Products* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sontek.com/oceanography.php/>
2. *Products* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nortekas.com/en/products>.
3. *Schadt K.J. Doppler Acoustic Current Measurements in High Currents / K.J. Schadt, R.C. Hamilton, D/ Grossman. – Marathon Oil Company, Evans-Hamilton, Inc., Coastal Leasing, Inc., IEEE, 1986. – 27 p.*
4. <http://www.oceanobservatories.org/2012/ooi-scientists-ignite-the-crowd-at-oceans-2012/>.
5. *Борисов С.А., Раскина М.А.* Восстановление профиля скорости звука в жидкой среде методом параллельных звуковых лучей. Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т. II. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 398 – 401.
6. *Микушин И.И., Серавин Г.Н.* Методы и средства измерения скорости звука в море. – СПб.: Судостроение, 2012. – 224 с.