

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА И ЗВУКА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ И АТМОСФЕРЕ

В.А. Гайский, А.Н. Греков

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Предлагается пространственное расширение дифференциального-временного метода измерения скорости потока и звука, позволяющее измерять вертикальные профили скоростей. Дается математическая модель построения профилей средних по слоям скоростей, состав и структура реализующих метод устройств.

Введение. Известны метод и устройства измерения профиля скорости потока, использующие зависимость доплеровского смещения частоты отраженного от неоднородностей среды по трассе акустического сигнала от отношения встречной или попутной составляющей скорости потока к скорости звука в среде [1]. Такие устройства называются акустическими доплеровскими профилографами скорости течения (АДПТ).

Принцип действия современных АДПТ заключается в импульсном зондировании водной толщи снизу вверх или сверху вниз двумя или более остронаправленными лучами наподобие эхолота. Сигналы, отраженные от неоднородностей воды различно удаленных слоев, несут в себе информацию о скорости течения, плотности отражателей и дальности до слоев в виде соответственно доплеровского сдвига частоты, амплитуды и временной задержки.

Скорость течения линейно зависит от величины доплеровского сдвига несущей частоты излученного сигнала и определяется по формуле:

$$V = \frac{CF_D}{2F_s \cos \alpha}, \quad (1)$$

где V – скорость течения; C – скорость распространения акустического сигнала в воде; F_D – доплеровский сдвиг частоты; F_s – излучаемая частота; α – угол между осью акустического луча и вектором скорости течения.

Измерения с помощью АДПТ осуществляются в предположении, что доплеровский сдвиг частоты зондирующего сигнала адекватно соответствует скорости переноса водных масс в выделенных для анализа слоях. На практике это не всегда оказывается так. Дело в том, что реально профилограф измеряет не скорость течения воды, а скорость движения частиц находящихся в воде, так как акустический луч может в достаточной мере отражаться только от твердых частиц находящихся в воде (взвеси, планктон, пузырьки) [2], или различных градиентов (температуры, плотности). В этом случае принимается второе допущение, что частицы, от которых отражается акустический сигнал, адекватно соответствуют скорости движения воды.

В реальной среде скорость звука зависит от стратификации и может изменяться по акустической трассе в море и водоеме на десятки процентов. Это приводит как к погрешностям измерения скорости потока, так и к погрешностям пространственной привязки по трассе результатов измерения. При отсутствии адекватной модели гидрофизических полей в состав АДПТ необходимо включать дополнительные средства измерения скорости звука, что повысит качество измерений, но усложнит и сделает дороже процедуру измерений.

Скорость звука можно контролировать, используя зондирующие приборы с измерителями электропроводности, глубины, температуры, по которым рассчитывается скорость звука или плотность и удельное волновое сопротивление [3].

Кроме того, профиль скорости звука представляет самостоятельный интерес.

Известные метод и устройства не обеспечивают одновременного измерения профиля скорости потока и профиля скорости звука.

Задачей исследования было создание метода, совокупностью существенных признаков которого обеспечивается технический результат – возможность одновременного контроля профиля составляющих горизонтального вектора скорости потока и профиля скорости звука в среде, что повышает точность измерений скорости потока и скорости звука в среде.

Структура измерителя и алгоритм его работы. Поставленная задача решается тем, что используют четыре акустических преобразователя, размещенных полярно на одной диагонали в горизонтальной плоскости в 1 – 2-ой и 3 – 4-ой вершинах квадрата и цепочку акустических отражателей, размещенных последовательно на держателе на оси, перпендикулярной плоскости квадрата и проходящей через центр квадрата, ориентируют акустические преобразователи на цепочку отражателей так, чтобы все отражатели находились в области диаграммы направленности каждого из акустических преобразователей, формируют поочередную передачу и прием отраженных встречных импульсных акустических сигналов парами акустических преобразователей, расположенных на одной диагонали квадрата, фиксируют времена прихода последовательности сигналов, отраженных от цепочки отражателей, определяют ортогональные составляющие $V_{x(i-1,i)}$ и $V_{y(i-1,i)}$ горизонтального вектора скорости потока и значения скорости звука C_x и C_y по осям x и y в слое между $(i-1)$ -м и i -м отражателями.

Для измерения составляющей вектора скорости, например V_{xi} в направлении оси x так, как это показано на рис. 1, акустические преобразователи Π_1 и Π_2 размещаются на оси x на расстоянии l_0 друг от друга, цепочка отражателей O_i устанавливается на держателе, проходящем через середину отрезка между преобразователями Π_1 и Π_2 , перпендикулярно к оси x вдоль профиля измеряемых величин по оси z , диаграммы направленности преобразователей Π_1 и Π_2 выполняются такими и ориентируются так, чтобы все отражатели находились в их области. Расстояния между отражателями O_i , $i = 1, n$ и число отражателей n устанавливаются исходя из требований пространственного разрешения по оси z и числа точек на профиле. Направление от преобразователей на i -й отражатель определяется углом α . Изме-

рения V_{xi} производят в два такта. В первом такте обеспечивают передачу импульсного акустического сигнала преобразователем Π_1 , прием – преобразователь Π_2 и фиксацию времен прихода τ_1 , последовательности отраженных от цепочки отражателей O_i сигналов.

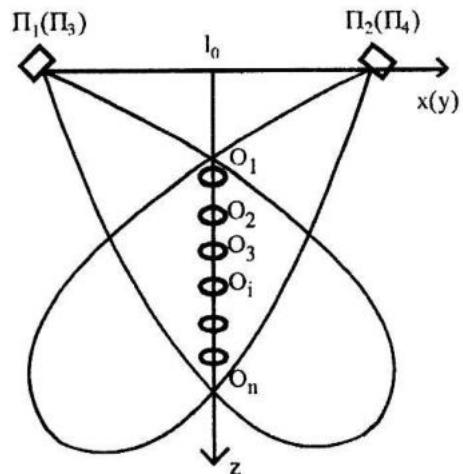
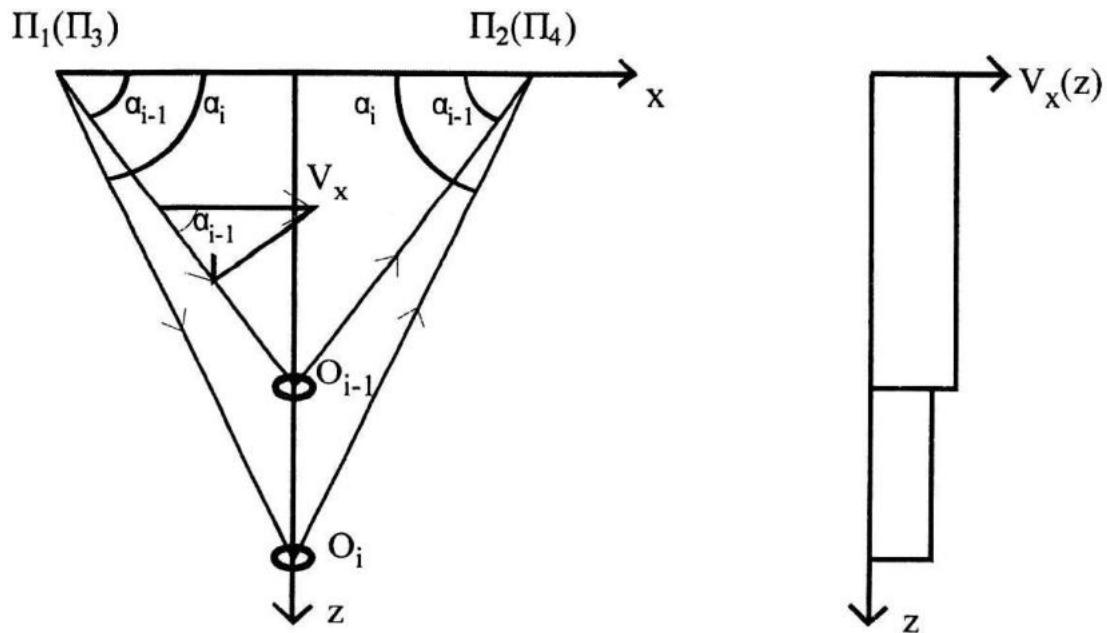


Рис. 1. Схема перекрытия диаграмм направленности пары акустических преобразователей $\Pi_1 - \Pi_2$ (или пары $\Pi_3 - \Pi_4$) на цепочке отражателей

Во втором такте обеспечивают передачу сигнала преобразователем Π_2 , а прием – преобразователь Π_1 и также фиксацию времен прихода τ_{12} последовательности отраженных сигналов.

Далее для определения составляющих V_{xi} скорости потока и C_{xi} скорости звука, соответствующих значениям средних величин в слое от горизонтали по оси x и i -ым отражателем по оси z , используют известный метод двух встречных акустических сигналов, суть которого для рассматриваемого способа поясняется на рис. 2, где представлена схема акустических трасс и составляющая V_{xi} вектора скорости потока.

В данном методе диаграммы направленности акустических преобразователей ориентированы так, что они захватывают все отражатели для преобразователей 2_1 и 2_2 – в плоскости xoz для преобразователей 2_3 и 2_4 – в плоскости uzo , и направления акустических трасс на i -й отражатель составляют с горизонталью угол α_i (рис. 2).



Р и с. 2. Схема акустических трасс преобразователей $\Pi_1 - \Pi_2$ (или $\Pi_3 - \Pi_4$) и график профиля вектора скорости потока

При работе устройства (рис. 3) пары акустических преобразователей $2_1, 2_2$ и $2_3, 2_4$ последовательно излучают встречно импульсные акустические сигналы и принимают отраженные, блок электроники 1 фиксирует времена прихода отраженных сигналов $\tau_{1i}, \tau_{2i}, \tau_{3i}, \tau_{4i}$, ($i = \overline{1, n}$) и определяет профили составляющих скорости звука $C_{x(i-1)i}, C_{y(i-1)i}$ и составляющих скорости потока $V_{x(i-1)i}$ и $V_{y(i-1)i}$.

В качестве отражателей 5_i могут использоваться круги, диски, сферы. Держателем 4 может быть стержень, трос, фал.

Математическая модель предложенного метода. При прохождении сигналом трассы $\Pi_1 - O_i - \Pi_2$ к скорости звука C_{xi} добавляется проекция составляющей вектора скорости течения вектора скорости течения, равная $V_{xi} \cos \alpha_i$, и суммарная скорость сигнала составляет $C_{xi} + V_{xi} \cos \alpha_i$.

Время прохождения трассы составит

$$\tau_{1i} = \frac{l_0}{\cos \alpha_i (C_{xi} + V_{xi} \cos \alpha_i)}, \quad (2)$$

где τ_{1i} – время прихода сигнала, излученного 1-м преобразователем, отраженного i -ым отражателем и принятым 2-м преобразователем; l_0 – расстояние по оси x между 1-м и 2-м преобразователями, и по оси y между 3-м и 4-м преобразователями; α_i – угол между горизонталью и направлением на i -й отражатель от преобразователя; $i = \overline{1, n}$.

При прохождении сигналом трассы $\Pi_2 - O_i - \Pi_1$ составляющая вектора скорости течения V_{xi} направлена встречно направлению распространения сигнала, поэтому суммарная скорость сигнала составляет $C_{xi} - V_{xi} \cos \alpha_i$, а время прохождения трассы составит

$$\tau_{2i} = \frac{l_0}{\cos \alpha_i (C_{xi} - V_{xi} \cos \alpha_i)}, \quad (3)$$

где τ_{2i} – время прихода сигнала, излученного 2-м преобразователем, отраженного i -м отражателем и принятым 1-м преобразователем.

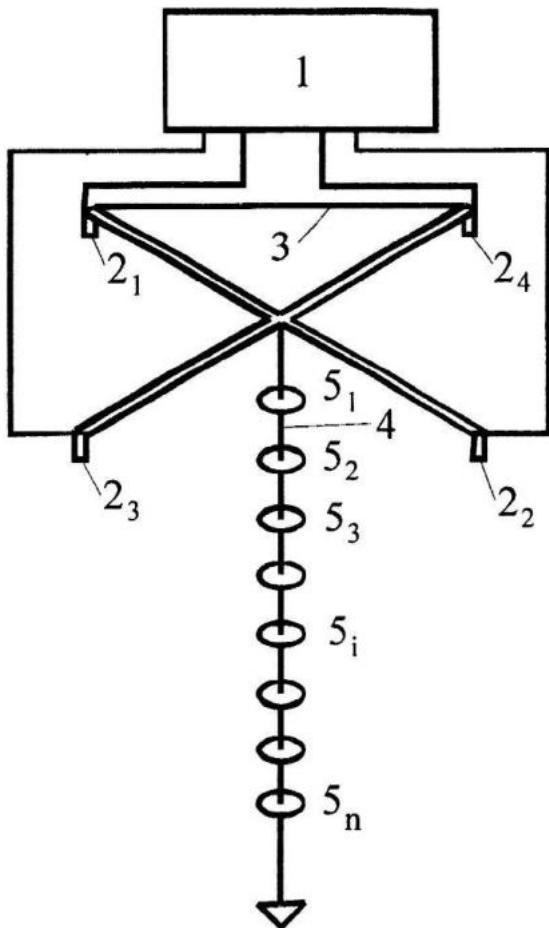


Рис. 3. Структурная схема устройства для реализации предложенного метода, которое содержит: 1 – блок электроники; 2 – подключенные к блоку электроники четыре акустических преобразователя $2_1, 2_2, 2_3, 2_4$ (соответственно $\Pi_1 - \Pi_4$); 3 – сторона квадрата, в вершинах которого размещены преобразователи, при этом диагонали квадрата имеют длину l_0 и ориентированы по осям x и y прямоугольной системы координат; 4 – держатель, установленный в центре квадрата по оси z ; 5_i ($i = 1, n$) – n акустических отражателей, закрепленных на держателе 4

Из выражений (2) и (3) получим для средних скоростей в i -том слое от 0 до i -го отражателя

$$C_{xi} = \frac{(\tau_{1i} + \tau_{2i})l_0}{2\tau_{1i} \cdot \tau_{2i} \cos \alpha_i}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

$$V_{xi} = \frac{(\tau_{2i} - \tau_{1i})l_0}{2\tau_{1i} \cdot \tau_{2i} \cos^2 \alpha_i}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Для получения профиля средних скоростей необходимо определить средние скорости в слоях между отражателями $(i-1)$ -м и i -м $V_{x(i-1)i}$ и $C_{x(i-1)i}$ можно записать

$$C_{xi} = \frac{C_{x(i-1)} \cdot z_{i-1}}{z_i} + C_{x(i-1)i} \frac{z_i - z_{i-1}}{z_i}, \quad (6)$$

$$V_{xi} = \frac{V_{x(i-1)} \cdot z_{i-1}}{z_i} + V_{x(i-1)i} \frac{z_i - z_{i-1}}{z_i}, \quad (7)$$

где z_i – координата i -го отражателя по оси z .

Из выражений (6) и (7) для профилей составляющих скоростей в плоскости xoz получим

$$C_{x(i-1)i} = \frac{C_{xi} \cdot z_i - C_{x(i-1)} \cdot z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}, \quad (8)$$

$$V_{x(i-1)i} = \frac{V_{xi} \cdot z_i - V_{x(i-1)} \cdot z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}. \quad (9)$$

Для получения профилей составляющих $V_{y(i-1)i}$ и $C_{y(i-1)i}$ скоростей в плоскости yoz аналогично используется вторая пара преобразователей Π_3 и Π_4 , выполняется передача и прием встречных акустических сигналов, фиксируются времена перехода отраженных сигналов τ_{3i} и τ_{4i} и используются формулы

$$C_{yi} = \frac{(\tau_{3i} + \tau_{4i})l_0}{2\tau_{3i} \cdot \tau_{4i} \cos \alpha_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

$$V_{yi} = \frac{(\tau_{4i} - \tau_{3i})l_0}{2\tau_{3i} \cdot \tau_{4i} \cos^2 \alpha_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

$$C_{y(i-1)i} = \frac{C_{yi} \cdot z_i - C_{y(i-1)} \cdot z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}, \quad (12)$$

$$V_{y(i-1)i} = \frac{V_{yi} \cdot z_i - V_{y(i-1)} \cdot z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}, \quad (13)$$

где τ_{3i} – время прихода сигнала, излученного 3-м преобразователем, отраженного i -ым отражателем и принятым 4-м преобразователем; τ_{4i} – время прихода сигнала, излученного 4-м преобразователем, отраженного i -ым отражателем и принятым 3-м преобразователем.

Поскольку исходными для вычислений являются геометрические параметры схемы расположения преобразователей l_0 и α_i , а также времена прихода отраженных сигналов $\tau_{1i}, \tau_{2i}, \tau_{3i}, \tau_{4i}$, $i = \overline{1, n}$, то целесообразно записать выражение для профилей скоростей из выражения в явном виде

$$C_{x(i-1)i} = \frac{l_0}{2(\operatorname{tg}\alpha_i - \operatorname{tg}\alpha_{i-1})} \left\{ \frac{[\tau_{2i} + \tau_{1i}] \sin \alpha_i}{\tau_{1i} \tau_{2i} \cos^2 \alpha_i} - \frac{[\tau_{2(i-1)} + \tau_{1(i-1)}] \sin \alpha_{i-1}}{\tau_{1(i-1)} \tau_{2(i-1)} \cos^2 \alpha_{i-1}} \right\}, \quad (14)$$

$$C_{y(i-1)i} = \frac{l_0}{2(\operatorname{tg}\alpha_i - \operatorname{tg}\alpha_{i-1})} \left\{ \frac{[\tau_{4i} + \tau_{3i}] \sin \alpha_i}{\tau_{3i} \tau_{4i} \cos^2 \alpha_i} - \frac{[\tau_{4(i-1)} + \tau_{3(i-1)}] \sin \alpha_{i-1}}{\tau_{3(i-1)} \tau_{4(i-1)} \cos^2 \alpha_{i-1}} \right\}, \quad (15)$$

$$V_{x(i-1)i} = \frac{l_0}{2(\operatorname{tg}\alpha_i - \operatorname{tg}\alpha_{i-1})} \left\{ \frac{[\tau_{2i} - \tau_{1i}] \sin \alpha_i}{\tau_{1i} \tau_{2i} \cos^3 \alpha_i} - \frac{[\tau_{2(i-1)} - \tau_{1(i-1)}] \sin \alpha_{i-1}}{\tau_{1(i-1)} \tau_{2(i-1)} \cos^3 \alpha_{i-1}} \right\}, \quad (16)$$

$$V_{y(i-1)i} = \frac{l_0}{2(\operatorname{tg}\alpha_i - \operatorname{tg}\alpha_{i-1})} \left\{ \frac{[\tau_{4i} - \tau_{3i}] \sin \alpha_i}{\tau_{3i} \tau_{4i} \cos^3 \alpha_i} - \frac{[\tau_{4(i-1)} - \tau_{3(i-1)}] \sin \alpha_{i-1}}{\tau_{3(i-1)} \tau_{4(i-1)} \cos^3 \alpha_{i-1}} \right\}. \quad (17)$$

Скорость звука $C_{(i-1)i}$ является скалярной величиной, однако, если $C_{x(i-1)i} \neq C_{y(i-1)i}$, то имеет место анизотропия скорости звука по осям x и y в слое между отражателями $(i-1)$ -м и i -м отражателями ($i = \overline{1, n}$).

Варианты использования прибора. Устройство может использоваться в водной среде в виде буя на растяжках с отражателями на тросе и акустическими преобразователями Π_1 – Π_4 , размещенными на буе (рис. 4), на дне (рис. 5). При использовании устройства в воздухе держателем 4 отражателей может быть мачта, а акустические преобразователи Π_1 – Π_4 могут быть размещены на поверхности земли (рис. 6).

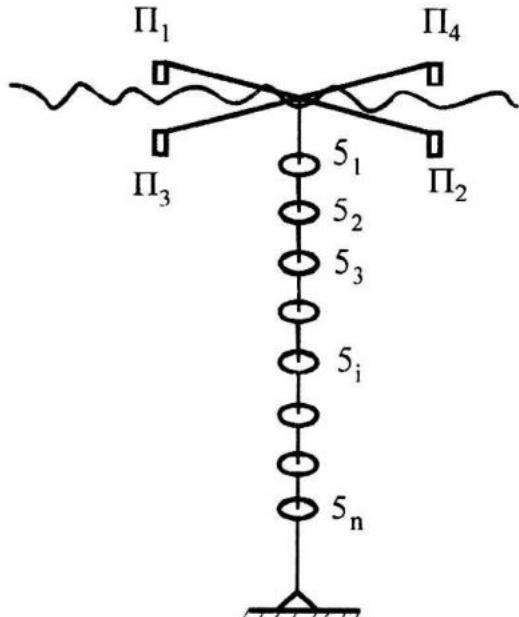
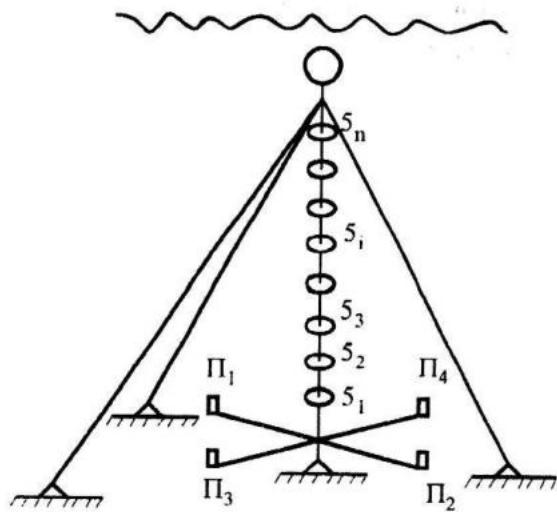
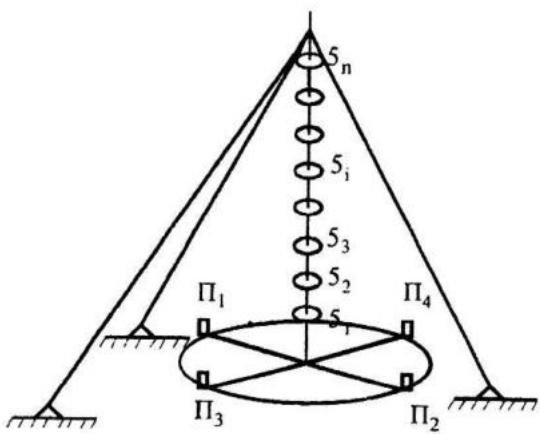


Рис. 4. Пример постановки устройства на буе



Р и с. 5. Пример постановки устройства на дне



Р и с. 6. Пример постановки устройства на воздухе

Указанный метод находится на стадии технического предложения и предназначен для использования в гидрометеорологии для измерения профилей скорости звука и профилей скорости ветра в атмосфере и профилей векторов течения в воде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hansen D.S. Asymptotic Performance of a Pulse-to-Pulse Incoherent Doppler Sonar in Oceanic Environment / D.S. Hansen // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1958. – Vol. OE-10, No. 2. – Р. 69 – 73.
2. Виноградов М.Е. Вертикальное распределение океанического зоопланктона / М.Е. Виноградов. – М.: Наука, 1968. – 113 с.
3. Забурдаев В.И. Дистанционные гидроизонды. – В кн.: Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – С. 547 – 557, 562 – 119.