

Режим генерации и приема сдвиговых волн разностной частоты в параметрическом профилографе

Ю.В. Душенин, П.П. Пивнев

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Донные осадки (ДО) представляют собой среды, в которых могут присутствовать как продольные, так и сдвиговые акустические колебания. Наличие нескольких компонент скорости в донных осадках дает возможность возбуждения различного типа волн как продольных, так и сдвиговых.

В данной работе проанализированы методы возбуждения, генерации и приема сдвиговых волн разностной частоты (ВРЧ) создаваемых параметрическими системами в ДО в режимах локации. Представлен анализ их работы в ДО, и даны их сравнительные характеристики по сравнению с возбуждением, формированием и распространением поля продольных ВРЧ в ДО.

Даны предпосылки к созданию параметрического профилографа, работающего с использованием метода возбуждения, генерации и локации сдвиговых волн в сложной многофазной среде «вода-ДО».

Представлена структурная схема и описан принцип работы параметрического профилографа на сдвиговых волнах.

Показаны достоинства и недостатки данного метода локации. Сделан вывод о возможности создания и рациональном применении систем, работающих на возбуждении сдвиговых волн.

Ключевые слова: параметрическая антенна, донные осадки, сдвиговые волны, волны разностной частоты, параметрический профилограф.

Параметрические антенны (ПА), благодаря своим уникальным свойствам, формируют высоконаправленное излучение в широкой полосе низких волн разностной частоты, при практически полном отсутствии бокового поля [1,2]. Поэтому они являются важнейшей частью параметрических профилографов (ПП), предназначенных для стратификации ДО и нахождения в них различного типа объектов, в том числе, и опасных для судоходства [3,4].

В работах [5,6] авторами были рассмотрены вопросы нелинейного взаимодействия продольных и сдвиговых волн накачки, формирующих в ДО волны разностной частоты.

Обобщенное уравнение, описывающее поведение осевого распределения амплитуды звукового давления продольных и сдвиговых ВРЧ

в сложной многофазной среде «вода-ДЮ», полученное на основе решения уравнения Хохлова-Заболотской-Кузнецова [7] может быть представлено в виде:

$$P_-(h, z) = \frac{iQ_B}{L_D} \int_0^h \Phi_0(r, h) dh + \frac{iQ_{1l(\tau)} W_{1l(\tau)}}{L_{D1l(\tau)}} \int_0^h \Phi_{1l(\tau)}(r, z) dz + \frac{iQ_{2l(\tau)} W_{2l(\tau)}^2}{L_{D2l(\tau)}} \int_h^z \Phi_{2l(\tau)}(r, z) dz \quad (1)$$

где l, τ – индексы, определяющие тип волн накачки и ВРЧ, продольных или сдвиговых;

$$Q_B = \frac{a^2 \Omega_-^2 \varepsilon_B p_{H1} p_{H2}}{8 \rho_B c_B^4 \exp\left(-\frac{h}{L_3}\right)}, \quad (2)$$

Q_B – константа, включающая параметры воды и антенны накачки;

$$\Phi_0(r, z) = \frac{\exp\left[\frac{h}{l_3^+} - \frac{2r^2(1 + \frac{ihL_d}{l_{d1}l_{d2}})}{a^2 \left[1 - \frac{i(h-z^*)}{L_d}\right] + z^* \left(\frac{2il_d}{l_{d1}l_{d2}} + \frac{h}{l_{d1}l_{d2}}\right)}\right]}{1 - \frac{i(h-z^*)}{L_d} + z^* \left(\frac{2il_d}{l_{d1}l_{d2}} + \frac{h}{l_{d1}l_{d2}}\right)} \quad (3)$$

$\Phi_0(r, z)$ – подинтегральное выражение, являющееся передаточной функцией поля ПА в воде;

a – апертура рабочей поверхности излучающей антенны накачки;

$\Omega_- = 2\pi F_-$ – разностная круговая частота;

F_- – ВРЧ;

f_0 – центральная частота волн накачки;

ε_B – параметр нелинейности воды;

ρ_B – плотность воды;

c_B – скорость распространения акустических волн в воде;

p_{01}, p_{02} – начальные уровни амплитуд давления волн накачки в воде;

h – координата вдоль направления распространения волн в воде;

$L_3 = 1/\beta_{-s}$ – длина зоны затухания ВРЧ в воде;

β_{-s} – коэффициент затухания ВРЧ в воде;

$L_d = S/2\Lambda_B$ - длина зоны дифракции ВРЧ в воде;

S - площадь рабочей поверхности излучающей антенны накачки;

Λ_B - длина волны ВРЧ в воде;

$$(l_3^+)^{-1} = (l_{301})^{-1} + (l_{302})^{-1} - (L_3)^{-1};$$

l_{301}, l_{302} - длины зон затухания волн накачки в воде

β_{H1}, β_{H2} - коэффициенты затухания волн накачки в воде;

$$l_d = S/\lambda_H \tag{4}$$

l_d - длина зоны дифракции волн накачки в воде;

$\lambda_{H1}, \lambda_{H2}$ - длины волн накачки в воде.

$$Q_{1l(\tau)} = \frac{a^2 \Omega^2 \varepsilon_{l(\tau)} p_{H1} p_{H2}}{8 \rho_{до} c_{l(\tau)}^4 \exp\left(-\frac{z}{L_{3l(\tau)}}\right)} \tag{5}$$

$Q_{1l(\tau)}$ - константа, включающая параметры ДО и антенны накачки;

$$\Phi_{1l(\tau)}(r, z) = \frac{\exp\left[-\frac{2r^2(1 + \frac{izL_{dl(\tau)}}{l_{d1l(\tau)}l_{d2l(\tau)}})}{a^2 \left[1 - \frac{i(z-z^*)}{L_{dl(\tau)}}\right] + z^* \left(\frac{2iL_{dl}}{l_{d1l(\tau)}l_{d2l(\tau)}} + \frac{z}{l_{d1l(\tau)}l_{d2l(\tau)}}\right)}\right]}{1 - \frac{i(z-z^*)}{L_{dl(\tau)}} + z^* \left(\frac{2iL_{dl}}{l_{d1l(\tau)}l_{d2l(\tau)}} + \frac{z}{l_{d1l(\tau)}l_{d2l(\tau)}}\right)} \tag{6}$$

$\Phi_{1l(\tau)}$ - подынтегральное выражение, являющееся передаточной функцией поля ПА в ДО, для случая, когда граница раздела является акустическим фильтром и из воды с ДО проходят и трансформируются в продольные или сдвиговые только ВРЧ;

$$Q_{2l(\tau)} = \frac{(a'_{l(\tau)})^2 \Omega^2 \varepsilon_{l(\tau)} p'_{H1} p'_{H2}}{8 \rho_{до} c_{l(\tau)}^4 \exp\left(-\frac{z}{L_{3l(\tau)}}\right)} \tag{7}$$

$Q_{2l(\tau)}$ - константа, включающая параметры ДО и «мнимой» антенны накачки, образующейся на границе раздела «вода-ДО»;

$$\Phi_{2l(\tau)}(r, z) = \frac{\exp\left[-\frac{z}{l'_{3l(\tau)}} \frac{2r^2(1 + \frac{izL'_{dl(\tau)}}{l'_{d1l(\tau)}l'_{d2l(\tau)}})}{(a')^2 \left[1 - \frac{i(z-z^*)}{L'_{dl(\tau)}}\right] + z^* \left(\frac{2iL'_{dl(\tau)}}{l'_{d1l(\tau)}l'_{d2l(\tau)}} + \frac{z}{l'_{d1l(\tau)}l'_{d2l(\tau)}}\right)}\right]}{1 - \frac{i(z-z^*)}{L'_{dl(\tau)}} + z^* \left(\frac{2iL'_{dl(\tau)}}{l'_{d1l(\tau)}l'_{d2l(\tau)}} + \frac{z}{l'_{d1l(\tau)}l'_{d2l(\tau)}}\right)} \tag{8}$$

$\Phi_{2l(\tau)}$ - подинтегральное выражение, являющееся передаточной функцией поля ПА в ДО, для случая, когда из воды, через границу раздела в ДО проходят и трансформируются в продольные или сдвиговые волны накачки;

$\varepsilon_{l(\tau)}$ - параметр нелинейности для продольных или сдвиговых волн в ДО;

$\rho_{до}$ - плотность ДО;

$c_{l(\tau)}$ - скорость распространения продольных или сдвиговых волн в ДО;

z - координата вдоль направления распространения волн в ДО;

$L_{3l(\tau)} = 1/\beta_{-l(\tau)}$ - длина зоны затухания продольных или сдвиговых прошедших и вновь образованных ВРЧ в ДО;

$\beta_{-l(\tau)}$ - коэффициент затухания прошедших продольных ВРЧ или вновь образованных продольных или сдвиговых ВРЧ в ДО;

$L_{dl(\tau)} = S/2A_{l(\tau)}$ - длина зоны дифракции продольных или сдвиговых ВРЧ в ДО;

S - площадь рабочей поверхности излучающей антенны накачки;

$A_{l(\tau)}$ - длина волны продольных или сдвиговых ВРЧ в ДО;

$W_{ll(\tau)}$ - коэффициент прохождения продольных или сдвиговых ВРЧ в ДО;

$W_{2l(\tau)}$ - коэффициент прохождения продольных или сдвиговых волн накачки в ДО;

$$l'_{dl2l(\tau)} = S'/\lambda_{н12l(\tau)} \quad (9)$$

$l'_{dl2l(\tau)}$ - длина зоны дифракции продольных или сдвиговых волн накачки «мнимой» антенны, образованной на границе раздела «вода-ДО»;

S' - площадь «мнимой» антенны накачки;

$\lambda'_{н1}, \lambda'_{н2}$ - длины продольных или сдвиговых волн накачки, создаваемых «мнимой» антенной на границе раздела «вода-ДО»;

z - координата вдоль направления распространения от границы раздела до точки наблюдения в ДО.

Первый интеграл в уравнении (1) описывает процесс взаимодействия исходных волн накачки в воде. Второй – процесс формирования продольных или сдвиговых ВРЧ, при их прохождении и трансформации через границу раздела «вода-ДО», без учета прохождения волн накачки. Третий интеграл описывает процесс формирования вновь образованных продольных или сдвиговых ВРЧ, образованных за счет взаимодействия прошедших через границу раздела в ДО и трансформировавшихся в продольные или сдвиговые волны накачки.

На основании уравнения (1) произведены расчеты осевых распределений амплитуд звуковых давлений ВРЧ в многофазной среде «вода – ДО» для трех случаев.

В первом случае рассчитаны амплитуды звуковых давлений ВРЧ в воде.

Во втором, сформированных продольных ВРЧ в осадках при вертикальном падении пучка ПА на границу раздела.

В третьем случае рассчитаны амплитуды звукового давления сдвиговых ВРЧ при падении пучка, создаваемого ПА на границу раздела «вода-ДО» под углами близкими к критическим.

Все расчеты выполнены для следующих значений:

- ВРЧ $F_0 = 5$ кГц, и являлась величиной постоянной при всех расчетах;
- исходные частоты накачки $f_0 = 250; 150$ и 100 кГц, при одинаковых величинах ширины характеристики направленности (ХН) антенн накачки на данных частотах;
- ширина ХН $2\theta_{0,7} = 4^\circ$;
- апертуры исходных антенн накачки - $a = 0,08; 0,13; 0,19$ м для частот $250; 150$ и 100 кГц, соответственно;

- амплитуда звукового давления волн накачки на поверхности антенны, приведенное к 1 метру, составила величину $p_0 = 500\,000$ Па.

При этом предельное значение уровня звукового давления по накачке при образовании ударного порога посчитано согласно выражению [7,8]:

$$p_{\text{пред.}} = \frac{2,23 \cdot 10^{11}}{f_0 l_d} \approx 1,05 * 10^6 \text{ Па.} \quad (10)$$

Для расчетов в качестве физических моделей ДО выбраны глина и песок со следующими параметрами.

Глина - удельная плотность $\rho = 1440$ кг/м³; скорость продольных волн $c_l = 1560$ м/с; коэффициент прохождения при возбуждении продольных волн накачки и ВРЧ $W_l = 0,8$; коэффициенты затухания продольных волн накачки на частотах 250; 150; 100 кГц, соответственно $\beta_{0l} = 30; 26; 22$ дБ/м ; коэффициент затухания продольной ВРЧ на частоте $F_- = 5$ кГц $\beta_{-l} = 5$ дБ/м; коэффициент нелинейности для продольных волн $\varepsilon_l = 8$; скорость сдвиговых волн $c_\tau = 350$ м/с; коэффициент прохождения при возбуждении сдвиговых волн накачки и ВРЧ $W_\tau = 0,15$, для критических углов порядка $\alpha = 20^\circ$; коэффициенты затухания сдвиговых волн накачки на частотах 250; 150; 100 кГц, соответственно $\beta_{0\tau} = 40; 35; 30$ дБ/м; коэффициент затухания сдвиговой ВРЧ на частоте $F_- = 5$ кГц $\beta_{-l} = 10$ дБ/м; параметр нелинейности для сдвиговых волн $\varepsilon_\tau = 16$.

Песок - удельная плотность $\rho = 2100$ кг/м³; скорость продольных волн $c_l = 1850$ м/с; коэффициент прохождения при возбуждении продольных волн накачки и ВРЧ $W_l = 0,6$; коэффициенты затухания продольных волн накачки на частотах 250; 150; 100 кГц, соответственно $\beta_{0l} = 40; 36; 32$ дБ/м ; коэффициент затухания продольной ВРЧ на частоте $F_- = 5$ кГц $\beta_{-l} = 8$ дБ/м; коэффициент нелинейности для продольных волн $\varepsilon_l = 10$; скорость сдвиговых волн $c_\tau = 250$ м/с; коэффициент прохождения при возбуждении сдвиговых волн накачки и ВРЧ $W_\tau = 0,1$, для критических углов порядка $\alpha = 15^\circ$;

коэффициенты затухания сдвиговых волн накачки на частотах 250; 150; 100 кГц, соответственно $\beta_{0\tau} = 60; 50; 40$ дБ/; коэффициент затухания сдвиговой ВРЧ на частоте $F_- = 5$ кГц $\beta_{-l} = 15$ дБ/м; параметр нелинейности для сдвиговых волн $\varepsilon_{\tau} = 20$.

Распределения амплитуд звуковых давлений сигналов первичных и вторичных полей на оси до границы раздела и после нее следует отнести к наиболее информативным характеристикам процесса нелинейного взаимодействия полей ПА, позволяющим составить наиболее полную физическую картину особенностей формирования ВРЧ в сложных многофазных средах «вода – ДО» [9, 10].

На рис. 1 приведены результаты расчетов осевых распределений амплитуд звуковых давлений ВРЧ в воде (сплошные кривые слева в графиках). А также продольных ВРЧ в ДО при вертикальном падении пучка на границу раздела (кривые, показанные штриховыми линиями справа в графиках) и сдвиговых ВРЧ возникающих в глине при падении пучка на границу раздела «вода-ДО» под углами близкими к критическим (кривые, показанные сплошными линиями слева в графиках).

На рис. 2 представлены такие же результаты в песке.

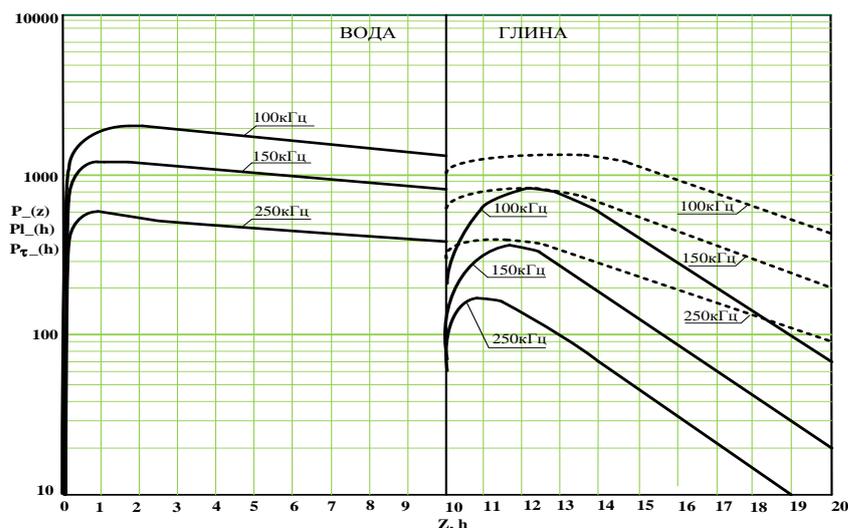


Рис. 1. – Осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ в воде, продольных ВРЧ и сдвиговых ВРЧ в глине

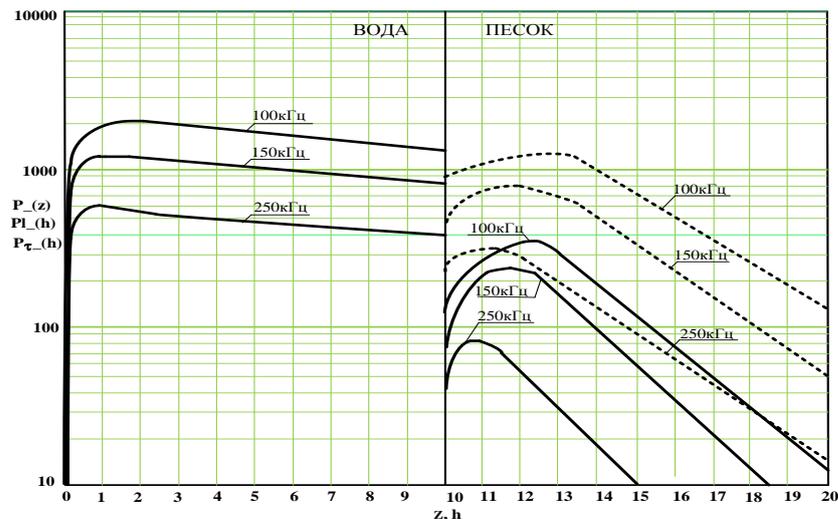


Рис. 2. – Осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ в воде, продольных ВРЧ и сдвиговых ВРЧ в песке

Из рис. 1, 2 видно, что осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ в воде носят традиционный для нелинейной гидроакустики характер. Для величины $F_- = 5$ кГц и частот накачки 250; 150; 100 кГц максимальные величины генерации ВРЧ, образуются на расстояниях равных величинам длин зон дифракции и составляют соответственно $l_{dl} = 0,85; 1,25$ и $1,85$ м.

Начальные величины осевых распределений амплитуд звуковых давлений продольных ВРЧ в глине и песке (штриховые линии в правой части графиков) имеют значения пропорциональные коэффициентам прохождения W_l , зависящим от типа ДО. Значения их максимальных величин при генерации совпадают с значениями, полученными по формуле (9) и для $F_- = 5$ кГц и частот накачки 250; 150; 100 кГц составляют соответственно: для глины - $l_{dl_{gl}} = 1,6; 2,4; 3,6$ м, для песка - $l_{dl_{пес}} = 3,6; 5,2; 7,9$ м.

Начальные величины осевых распределений амплитуд звуковых давлений сдвиговых ВРЧ в глине и песке (непрерывные линии в правой части графиков) имеют значения пропорциональные коэффициентам

прохождения W_{τ} , зависящим от типа ДО. Значения их максимальных величин при генерации равны: для глины – 0,9; 1,8; 2,2 м, для песка – 0,8; 1,7; 2,1 м при частотах накачки 250; 150; 100 кГц, соответственно, не совпадают с значениями, полученными по формуле (9): для глины - $l_{d_{гел}} = 1,6; 2,4; 3,6$ м, для песка - $l_{d_{тес}} = 3,6; 5,2; 7,9$ м.

Этот факт говорит о преобладании диссипативных эффектов над нелинейными эффектами при формировании, генерации и распространении сдвиговых ВРЧ в ДО.

Из рис. 1, 2 также видно, что уровни звуковых давлений сдвиговых ВРЧ по амплитуде сопоставимы с уровнями продольных ВРЧ [11, 12]. И, хотя сдвиговые ВРЧ быстро затухают в ДО, но на расстояниях близких к границе раздела они могут использоваться наравне с продольными ВРЧ, в задачах, связанных с донным профилированием и поиском находящихся в ДО объектов.

В работах [5, 6] показан эксперимент, подтверждающий возможность локации с использованием параметрической системы при возбуждении, генерации и распространении сдвиговых ВРЧ в ДО.

На рис. 3 представлен принцип работы ПП при формировании, возбуждении и распространении сдвиговых ВРЧ.

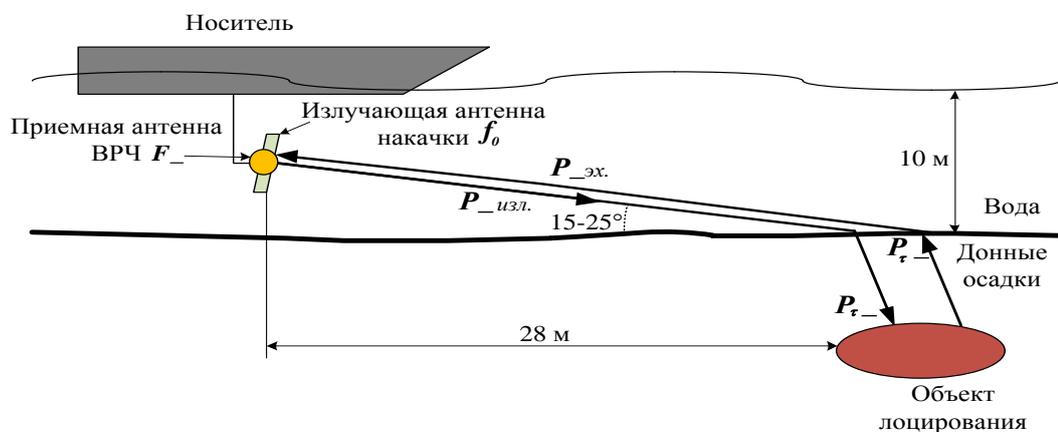


Рис. 3. – Принцип работы ПП при формировании, возбуждении и распространении сдвиговых ВРЧ

Из рисунка видно, что антенна накачки закреплена под углом $\approx 15-25^\circ$ к границе раздела. При излучении поле ПА вначале формируется в воде, затем, на границе раздела «вода - ДО» происходит трансформация волн накачки и сформированных ВРЧ в сдвиговые волны с заданными коэффициентами прохождения, которые облучают объект поиска в ДО и отражаются от него в том же направлении, что и пришедшие. После этого на границе раздела происходит обратная трансформация волн с заданными коэффициентами прохождения и волны возвращаются к приемной антенне ВРЧ, расположенной рядом с излучающей антенной накачки [13, 14].

Из рис. 3 очевидно преимущество формирования и лоцирования сдвиговых ВРЧ. При вертикальном зондировании носитель ПП находится непосредственно под объектом поиска. При этом расстояние до озвучиваемого объекта, находящегося в ДО значительно меньше, чем для случая, когда лоцирование происходит под углами, близкими к критическим, что значительно снижает вероятность повреждения носителя ПП при взрыве находящегося в ДО потенциально опасного объекта.

Также одним из основных параметров любой гидролокационной системы, является разрешающая способность по дальности Δr . Ее значение позволяет определить, на каком минимальном расстоянии два объекта или два разнородных слоя ДО будут различимы при их лоцировании.

Формула для расчета разрешающей способности по дальности может быть записана в виде [8]:

$$\Delta r = \frac{c_l(\tau)\tau_{\text{имп}}}{2}, \quad (11)$$

Исходя из данного выражения можно посчитать, что при излучении импульса величиной $\tau_{\text{имп}} = 2$ мс, на частоте ВРЧ $F_ = 5$ кГц, и при скорости звука продольных ВРЧ в песке $c_l = 1850$ м/с, разрешающая способность по дальности при работе ПП в режиме возбуждения продольных ВРЧ, составит

$\Delta r_l = 1,85$ м. А при той же длительности $\tau_{\text{ИМП}}$ и скорости сдвиговых волн $c_\tau = 250$ м/с, разрешающая способность по дальности при работе ПП, составит $\Delta r_\tau = 0,25$ м.

В глине при $c_l = 1560$ м/с и $c_\tau = 350$ м/с при $\tau_{\text{ИМП}} = 2$ мс разрешающая способность по дальности будет иметь значения 1,56 м и 0,35 м, соответственно.

Таким образом, при работе ПП на сдвиговых ВРЧ разрешающая способность по дальности в 5 - 7 раз лучше, чем при лоцировании продольных ВРЧ.

Структурная схема ПП, принцип работы которого основан на возбуждении и распространении сдвиговых ВРЧ в ДО представлена на рис. 4.

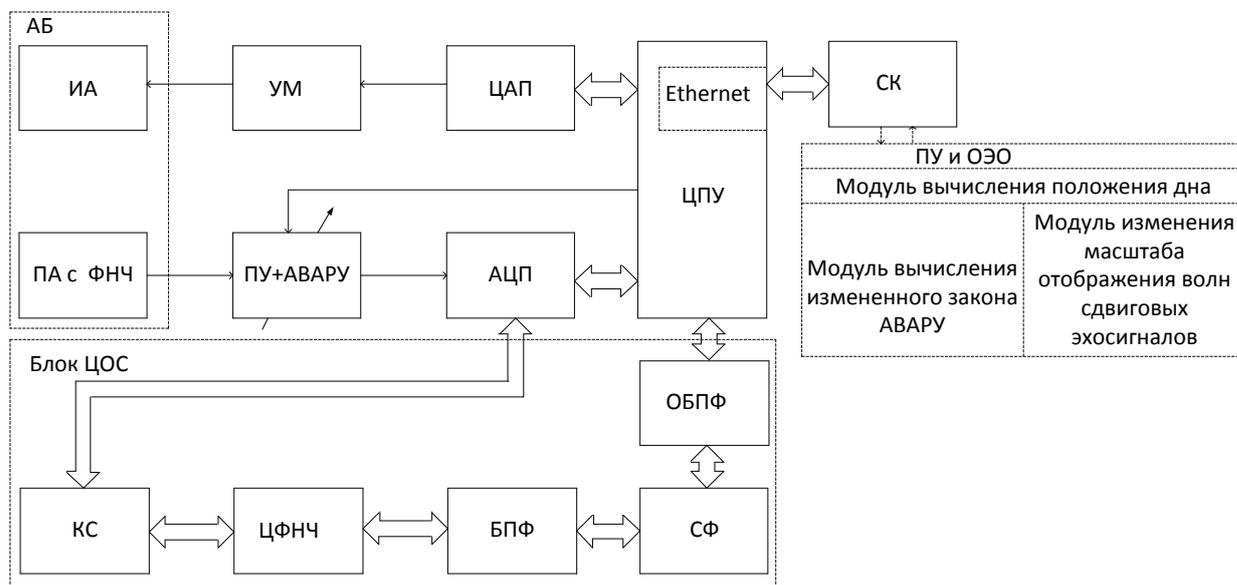


Рис. 4. – Структурная схема ПП, работающего на сдвиговых ВРЧ в ДО

В состав ПП входят системный компьютер (СК), контроллер управления режимами и интерфейсом связи (ЦПУ) с СК, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), выходной усилитель мощности (УМ) сигнала

накачки, излучающая антенна накачки (ИА), приёмная антенна эхосигналов ВРЧ с пассивным фильтром нижних частот (ПА с ФНЧ), предварительный усилитель с функцией адаптивной временной автоматической регулировки усиления (ПА+АВАРУ) [6], аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и блок цифровой обработки сигналов (ЦОС). ЦОС выполняет следующие операции: квадратурного смесителя, двухканального цифрового фильтра нижних частот (ЦФНЧ), быстрого преобразования Фурье (БПФ), согласованного фильтра (СФ) и обратного быстрого преобразования Фурье ОБПФ [15, 16].

Работа ПП происходит следующим образом.

При включенном ПП при запуске рабочей программы управления ПП и отображения эхосигнальной обстановки (ПУ и ОЭО) последняя устанавливает связь по сети (Ethernet) с ЦПУ и передаёт определенные оператором параметры: вид модуляции, несущую разностную частоту, девиацию частоты, длительность зондирующего импульса, диапазон отображаемых дальностей (в пересчете на водное пространство), параметры АВАРУ и по получении данных о приёме – команду начала зондирования.

ЦПУ генерирует цифровую последовательность отсчетов зондирующего сигнала накачки, которая в ЦАП преобразуется в аналоговую форму, усиливается УМ и подается на излучатель накачки ИА. В среде «вода-ДО» происходит формирование зондирующего сигнала ВРЧ, который, отражаясь от донных слоев и заглубленных в ДО целей, принимается приемной антенной (ПА) ВРЧ, в которой предусмотрен фильтр нижних частот (ФНЧ) для подавления сигналов с частотами накачки.

С выхода ПА с ФНЧ эхосигналы поступают на ПУ с АВАРУ, в котором предварительно усиливаются по амплитуде в соответствии с установленным ПУ и ОЭО и транслируемым в ЦПУ законом АВАРУ.

С выхода АЦП последовательность выборок эхосигнала поступает на вход цифрового квадратурного смесителя (КС), в котором осуществляется

вычисление квадратур комплексной огибающей эхосигнала, которые через двухканальный ФНЧ подвергаются процедуре быстрого преобразования Фурье (БПФ). С выхода БПФ комплексные спектры эхосигнала проходят процедуру согласованной фильтрации (СФ), где спектры синусоидальных и косинусоидальных составляющих перемножаются на комплексно сопряженные спектры сигнала. С выходов СФ составляющие отклика подвергаются процедуре обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) и, далее, транслируются ЦПУ в СК, где ПУ и ОЭО вычисляет модуль комплексной огибающей отклика СФ.

Отличие структуры ПП, работающего на сдвиговых ВРЧ, от традиционных ПП заключается в наличии в ПУ и ОЭО модуля вычисления положения дна, который по результатам серии предыдущих зондирований прогнозирует дальность нахождения границы раздела «вода-ДО», с последующим вычислением закона АВАРУ эхосигнала [17]. А с помощью программного модуля изменения масштаба отображения эхосигналов, выбирается новый масштаб по дальности отображения на эхограмме эхосигналов за границей раздела «вода – ДО», учитывающий изменение скорости распространения сдвиговых ВРЧ.

Таким образом, неоспоримым достоинством данного ПП является безопасность судоходства носителя, осуществляющего поиск находящихся под дном взрывоопасных объектов. При данном режиме локации эти объекты будут находиться далеко впереди по ходу его движения. Кроме того, такой ПП будет иметь лучшую разрешающую способность по дальности, за счет меньших величин сдвиговых скоростей звука ВРЧ в ДО.

Литература

1. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. - Л.: Судостроение, 1981. - 264 с.

2. Наугольных К.А., Островский Л.А., Сутин А.М. Параметрические излучатели звука. Нелинейная акустика. Горький: Институт прикладной физики, 1980, с. 9-30.
3. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975, - 290 с.
4. Пивнев П.П. Параметрические широкополосные системы мониторинга и связи в гидроакустике. // Инженерный вестник Дона, 2019. - №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5714.
5. Душенин Ю.В. Исследование нелинейного взаимодействия сдвиговых акустических волн в донных осадках, возбуждаемых параметрической излучающей антенной на границе раздела.// Инженерный вестник Дона. 2015. -№ 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476/.
6. Dushenin Yu.V., Rybachek M.S. Study of Nonlinear Interaction of Acoustic Waves Driven by Parametric Radiating Antenna During Sounding of Bottom Sediments. // Exploration and Monitoring of the Continental Shelf Underwater Environment. / Edited by I.B. Abbasov. – Wiley & Sons and Scrivener Publishing LLC, 2018. – P. 167–210. – ISBN: 978-1-119-48828-6.
7. Зарембо Л.К., Тимошенко В.И. Нелинейная акустика. М.: Из-во Московского университета, 1984, - 104 с.
8. Зарайский В.А., Тюрин А.М. Основы гидроакустики. Л.: Военно-морская орденов Ленина и Ушакова академия, 1975. - 604 с.
9. Заславский Г.М. Нелинейные волны и их взаимодействие. // Успехи физических наук. 1973г., том 111, вып.3, с. 395-426.
10. Mikhalevsky P. Basin-Wide High Arctic Acoustic Network — status and possibilities. Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. (Corfu, Greece, 2013). p. 325-332.
11. Горская Н.С., Островский Л.А., Сутин А.М. Параметрическое излучение звука в мелком море. // Акустический журнал, 1983г., том XXIX, вып. 4. с. 451-455.

12. Мосолов С.С., Скнаря А.В., Тутынин Е.В, Залогин Н.Н. Некоторые аспекты и перспективы применения сложных сигналов в гидроакустике // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ РАН, 29 ноября - 3 декабря 2010. - с. 170-174.
13. Морская сейсмозвездка / Под редакцией А.Н.Телегина. - М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – 237 с.
14. Акустика морских осадков. Под ред. Л.Хэмптона. – М.: Мир, 1977. – 533 с.
15. Гурский В.В. Сложные сигналы и ВАРУ. // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Экология 2013 – море и человек» – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. - с. 105–108.
16. Маркович И.И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах: монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – 236 с.
17. Esipov I. B., Tarasov S. P., Voronin V. A., Popov O. E. Parametric array signal dispersion in shallow water. AIP Conference Proceedings. V. 1022. No. 1. Pp. 393-396; URL: doi.org/10.1063/1.2956240.

References

1. Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I. Nelineynaya gidroakustika. [Nonlinear hydroacoustics]. L.: Sudostroyeniye, 1981. 264 p.
2. Naugol'nykh K.A., Ostrovskiy L.A., Sutin A.M. Parametricheskiye izluchateli zvuka. V kn.: Nelineynaya akustika. [Nonlinear acoustics]. Gor'kiy: Institut prikladnoy fiziki, 1980, pp. 9-30.
3. Rudenko O.V., Soluyan S.I. Teoreticheskiye osnovy nelineynoy akustiki. [Theoretical foundations of nonlinear acoustics]. M.: Nauka, 1975, 290 p.
4. Pivnev P.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5714.

5. Dushenin YU.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476.
6. Dushenin Yu.V., Rybachek M.S. Exploration and Monitoring of the Continental Shelf Underwater Environment. Edited by I.B. Abbasov. Wiley & Sons and Scrivener Publishing LLC, 2018. pp. 167–210.
7. Zarembo L.K., Timoshenko V.I. Nelineynaya akustika. [Nonlinear acoustics]. M.: Iz-vo Moskovskogo universiteta, 1984, 104 p.
8. Zarajskij V.A., Tyurin A.M. Osnovy gidroakustiki. [Basics of hydroacoustics]. L.: Voenno-morskaya ordenov Lenina i Ushakova akademiya, 1975, 604 p.
9. Zaslavskiy G.M. Nelineynnye volny i ikh vzaimodeystviye. Uspekhi fizicheskikh nauk. 1973, tom 111, vyp.3, pp. 395-426.
10. Mikhalevsky P. Basin-Wide High Arctic Acoustic Network — status and possibilities. Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. (Corfu, Greece, 2013). pp. 325-332.
11. Gorskaya N.S., Ostrovskiy L.A., Sutin A.M. Akusticheskiy zhurnal, 1983g., tom XXIX, vyp. 4. pp. 451-455.
12. Mosolov S.S., Sknarya A.V., Tutynin E.V., Zalogin N.N. IV Vserossiyskaya konferenciya «Radiolokaciya i radiosvyaz'». M.: IRE RAN, 29 noyabrya - 3 dekabrya 2010. pp. 170-174.
13. Morskaja sejsmorazvedka. [Marine seismic]. Pod redakciej A.N.Telegina. M.: OOO «Geoinformmark», 2004. 237 p.
14. Akustika morskikh osadkov. [Acoustics marine sediments]. Pod red. L.Hjempton. M.: Mir, 1977. 533 p.
15. Gurskij V.V. Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. Tematicheskij vypusk «Ekologiya 2013 – more i chelovek» Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU, 2013. pp. 105–108.



16. Markovich I.I. Cifrovaya obrabotka signalov v sistemah i ustrojstvah [Digital signal processing in systems and devices: monograph]: monografiya. Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU, 2012, 236 p.

17. Esipov I. B., Tarasov S. P., Voronin V. A., Popov O. E. Parametric array signal dispersion in shallow water. AIP Conference Proceedings. V. 1022. No. 1. pp. 393-396; URL: doi.org/10.1063/1.2956240.