УДК 534.231

МОБИЛЬНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРИЕМНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

В.А. Щуров С.Г. Щеглов Е.Н. Иванов Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹ Кафедра физики Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского²

Статья посвящена анализу энергетических свойств векторных акустических полей в плане возможного применения этих свойств в практической гидроакустике. Такая возможность может быть осуществлена по следующим причинам. Векторно-фазовые измерения позволяют получить все компоненты тензора энергии – импульса, т.е. полную информацию об акустическом поле в точке измерения, которую невозможно получить, измеряя только характеристики скалярного поля давления. Комбинированный приемник обладает новым универсальным свойством – он позволяет определить направление на источник. Кроме того, его размеры много меньше длины волны измеряемого поля, что позволяет расположить приемник на малоразмерных автономных необитаемых подводных аппаратах. По существу, система, построенная на векторно-фазовых измерениях, является акустической системой нового поколения и позволяет решать задачи обнаружения и целеуказания на новых принципах и с большими возможностями.

введение

Дискуссия о возможности применения векторно-фазового метода в отечественной гидроакустике продолжается в российской научной печати уже более 50 лет. Началом дискуссии можно считать 1961 год, когда издательством «Судпромгиз» была издана переведенная с английского монография Дж.У. Хортона «Основы гидролокации». Редактор издания А.Г. Кухаренко активно пропагандировал внедрение в практическую гидроакустику гидрофонов колебательной скорости (название приводится по американской терминологии), но встретил со стороны прикладной акустической науки яростное противодействие. В МГУ им. М.В. Ломоносова на кафедре акустики физического

факультета в то время успешно велись исследования в этой области (С.Н. Ржевкин, Л.Н. Захаров), и уже в то время была ясной перспективность применения этого метода в гидроакустике. К настоящему времени академической наукой России в области исследования векторных акустических свойств океана достигнуты значительные успехи, которые могут быть положены в основу построения принципиально новой гидроакустической техники.

Современные исследования в области векторной акустики океана показывают, что внедрение векторно-фазовых методов в системы обнаружения и целеуказания может дать значительный эффект в дальности и надежности обнаружения как в режиме шумопеленгования, так и в активном режиме. В состав одиночного комбинированного приемника входят канал акустического давления p(t) и три ортогональных канала векторного приемника колебательной скорости $V(t) \{V_x(t), V_y(t), V_z(t)\}$. Все каналы комбинированного приемника имеют единый фазовый центр, расположенный в геометрическом центре сферы векторного приемника. Важнейшую роль в концепции векторно-фазового играют метода разностнофазовые соотношения между акустическим давлением и компонентами колебатель- $\Delta \varphi_x = \varphi_p - \varphi_x,$ ной скорости: $\Delta \varphi_{v} = \varphi_{n} - \varphi_{v},$ $\Delta \varphi_z = \varphi_p - \varphi_z$ И разностно-фазовые соотношения между ортогональными

¹ 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; e-mail: shchurov@poi.dvo.ru

² 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50a

компонентами колебательной скорости: $\Delta \varphi_{xy} = \varphi_x - \varphi_y$, $\Delta \varphi_{xz} = \varphi_x - \varphi_z, \ \Delta \varphi_{yz} = \varphi_y - \varphi_z.$ Из автокорреляционных и взаимнокорреляционных соотношений набора данных p(t), $V_{-}(t)$, $V_{v}(t), V_{z}(t)$ находят все компоненты тензора энергии – импульса акустического поля. Существуют определенные технические сложности при построении комбинированных систем (шумы обтекания потока жидкости, вибрации, собственные резонансные колебания приемника), однако все эти технические проблемы имеют решение.

1. К вопросу о помехоустойчивости одиночного комбинированного приемника

Традиционные приемные и измерительные акустические системы построены на основе гидрофонов - скалярных приемников. Алгоритм формирования диаграммы направленности антенны основан на суммировании с соответствующей задержкой сигналов от всех гидрофонов, образующих антенну. Диаграмма направленности антенны есть результат интерференции сигналов, снятых с ее элементов - датчиков акустического давления. Параметр акустического поля – давление - есть скалярная величина, которая определяет скалярную величину - плотность потенциальной энергии $U(t) = \frac{1}{4\rho c^2} p(t) p^*(t)$, где р плотность среды, с – скорость звука, $p^*(t)$ – комплексносопряженная величина для p(t). Для гидрофонной антенны алгоритм суммирования сигналов является оптимальным. Если сигнал с элементов антенны не суммировать, но умножать, то помехоустойчивость

такой антенны будет не лучше, чем при суммировании. Комбинированный четырехкомпонентный приемник состоит из гидрофона (преобразователя нулевого порядка) и трехкомпонентного приемника колебательной скорости (трех преобразователей первого порядка). Преобразователи первого порядка расположены по осям x, y, z системы координат и имеют следующие объемные характеристики направленности [1]:

> $R_{x} = R_{0} \sin \theta \cos \varphi,$ $R_{y} = R_{0} \sin \theta \sin \varphi,$ (1) $R_{z} = R_{0} \cos \theta,$

где R_0 — осевая чувствительность каналов *x*, *y*, *z*; φ — азимутальный и θ — полярный углы.

Извыражения $R_x^2 + R_y^2 + R_z^2 = R_0^2$ следует, что характеристика направленности векторного приемника не зависит от ϕ и θ , т.е. является сферой. Таким образом, комбинированный приемник в целом имеет сферическую характеристику направленности, и характеристики направленности каждого отдельного канала x, y, z определяются только его принципом действия и не зависят от свойств акустического поля. Алгоритмы обработки заключаются в суммировании отдельных каналов p(t)и $V_{i}(t)$ или в их перемножении, где i = x, y, z. В первом случае характеристика направленности - кардиоида, во втором - диполь. При обработке сигналов во временной области используется преобразование Гильберта, при обработке сигналов в частотной области - преобразование Фурье.

Известно, что в случае плоской волны и модели изотропного шума отношение сигнал-шум SNR для линейной антенны запишется в виде:

 $SNR = 10 \lg(\sigma_1^2 / \sigma_2^2) + 10 \lg N$, (2)

где $10lg(\sigma_s^2/\sigma_N^2)$ – усиление на выходе одиночного элемента антенны; 10lgN – коэффициент усиления антенны, который определяется числом ее элементов *N*. Элементы антенны должны располагаться с интервалами, равными половине длины волны. Отсюда следует, что на низких частотах длины антенн могут быть значительными.

В отличие от гидрофонных протяженных антенн комбинированный приемник, по существу, является точечным. Диаметр *D* комбинированного приемника должен удовлетворять условию $D < \lambda_{\min}/3$, где λ_{\min} – длина волны верхней границы частотного диапазона. Обычно протяженная гидрофонная антенна настроена на ряд конкретных частот. Комбинированный приемник является широкополосным устройством, и рабочий диапазон низких частот обычно составляет от ~1,0 Гц до 1000 Гц; высоких частот - от ~1000 Гц до 10 кГц. Векторно-фазовый подход позволяет создать принципиально отличающуюся от существующей технику и методологию нового поколения систем подводной навигации, обнаружения и целеуказания. Универсальность комбинированного приемника проявляется в его способности определять направление на цель из одной точки, т.е. давать направление для целеуказания. Таким образом, переход от приема на гидрофон к комбинированному приему дает возможность выйти из области скалярных величин поля и перейти в векторную область акустики и получить далее тензор энергии импульса акустического поля. Комбинированный приемник расширяет область исследуемых измеряемых величин акустического поля и дает принципиально полную информацию о сложном акустическом поле.

Рассмотрим векторно-фазовые свойства акустических полей подводного окружающего шума и сигнала.

1. Поле подводного окружающего шума представляет собой сумму анизотропного и диффузного полей. При вычислении вектора плотности потока энергии акустического поля (вектора интенсивности) $\vec{L} = \left\langle r(x, t)\vec{V}^*(x, t) \right\rangle$

$$I = \langle p(r,t)V (r,t) \rangle =$$

= $\frac{1}{2} p_0(t) \vec{V}_0^*(r) = \vec{I}_{anus} + \vec{I}_{\partial u \phi}$

диффузная часть $\vec{I}_{\partial u\phi} \rightarrow 0$, при этом выигрыш сигнал/шум S^2 / N^2 для анизотропной компоненты может составлять ~ (16÷20) дБ. При усреднении не только среднее значение $\vec{I}_{\partial u\phi} \rightarrow 0$, но и среднеквадратичное отклонение $\sigma \rightarrow 0$. Этот результат подтверждается как российскими, так и зарубежными исследователями [2]. Разберем, для примера, особенности реальных спектров акустического давления $S_{p2}(f)$ и взаимного спектра p(t) и $V_y(t)$ компоненты колебательной скорости $S_{pv}(f)$ (рис. 1):

а) на высоких частотах f > 200 Гц спектр $S_{_{PV.}}(f)$ находится ниже спектра $\dot{S}_{p2}(f)$ по крайней мере не менее чем на 15 дБ; функция когерентности $\gamma^2_{PV_{\nu}}(f) \approx 0$ при f > 200 Гц, что указывает на то, что в этой области спектра нет сосредоточенных источников звука и акустическое поле в этом диапазоне частот является диффузным полем; фазовый спектр $\Delta arphi_{av}(f)$ при f > 200 Гц является случайным, что опять указывает на отсутствие в этой области частот сосредоточенных источников звука;

б) однако в области низких частот f < 200 Гц поле шумов





В реальном океане акустическая энергия от одиночного источника звука достигает точки измерения несколькими путями. В случае распространения монохроматических волн от одного источника по нескольким путям при наложении

одного источника по нескольким путям при наложении пересекающихся потоков энергии происходит их когерентное сложение, приводящее к осцилляции плотности потока энергии на данной частоте как по уровню, так и, что чрезвычайно важно, по направлению. Для двух плоских бегущих в одном направлении волн плотности потока энергии не аддитивны. Так, плотность потока энергии суммы двух волн $p = p_1(t - x/c) + p_2(t - x/c)$ есть

в основном анизотропно, по-

скольку в океане существуют

шумы дальнего судоходства,

распространяющиеся на сот-

ни километров. Спектр $S_{r2}(f)$ в

этой области частот имеет уро-

вень на ≈15 дБ выше, чем при

f > 200 Гц. Уровень спектра

 $S_{_{PV}}(f)$ также ниже уровня $S_{_{P2}}(f)$

и имеет ряд дискретных частот

в области от ~30 Гц до ~60 Гц

с превышением над шумом не

менее чем на 10 дБ; функция

когерентности $\gamma_{PV}^2(f)$ доволь-

но точно ограничивает область

шумов дальнего судоходства и

сигналов, наблюдаемых на их

фоне; фазовый спектр $\Delta \varphi_{a}(f)$

указывает на то, что часть шу-

мов в области дальнего судоход-

ства приходит с направления

 0° (относительно оси *y*), другая

торных энергетических ком-

введенных в алгоритм обнаружения, позволит значительно повысить отношение S^2/N^2 и

создать более перспективные системы обнаружения и целеу-

встречных потоков энергии.

Таким образом, анализ век-

акустического поля,

Явление компенсации

часть – с направления 180°.

понент

казания. **2**. Я

6

$$I = \frac{1}{\rho c} p^2 = I_1 + I_2 + \frac{2}{\rho c} p_1 p_2,$$
 (3)

где $I_1 = p_1^2 / \rho c$, $I_2 = p_2^2 / \rho c$, p_1 , p_2 – амплитуды первой и второй волн соответственно; ρ – плотность, c – скорость звука [3].

Плотность потока энергии при пересечении двух плоских волн, бегущих навстречу друг другу, всегда равна разности плотностей потоков энергии этих волн. Например, сумма волн, бегущих по направлению +x и направлению -x, $p_1 = p_1(t - x/c)$ и $p_2(t + x/c)$ есть $p = p_1 + p_2$, $v = v_1 + v_2 =$

$$= \frac{1}{\rho c} (p_1 - p_2), \text{ откуда:}$$

$$I = pv = (p_1 + p_2) \frac{1}{\rho c} (p_1 - p_2) = I_1 - I_2.$$
(4)

Из выражений (3) и (4) возможны следующие принципиальные выводы. В выражении (3) для измерения І необходимо раздельно измерить p_1 и p_2 , однако в реальном эксперименте можно измерить только результирующее давление р. В выражении (4) присутствует множитель (p₁ - p₂), который из измерений только давления в реальном акустическом поле (даже в случае суперпозиции двух плоских волн) получить невозможно, не измеряя колебательную скорость v. Результат формулы (4) назван компенсацией встречных потоков энергии и был впервые обнаружен в акустических полях подводного окружающего шума реального океана [1]. Особенно отчетливо компенсация встречных потоков энергии проявляется во взаимных спектрах p(t) и $V_{r}(t)$. На рис. 2 приведены результаты компенсации вертикальной компоненты вектора интенсивности. Сигнал тонального источника

на спектральной составляющей f = 402 Гц виден над спектром $S_{n}(f)$ с большим превышением, но в z-канал ослабленный сигнал попадает после отражения от дна и в результате «конкуренции» с поверхностным шумом дает «нуль вертикального потока мощности». Этот результат показывает, что подводный окружающий шум как бы «освещает» глубину океана, и при комбинированном приеме встречный сигнал от локального источника «проявляется» в окружающем шуме в виде провала на взаимных спектрах, функциях когерентности и фазовых спектрах.

Рис. 3 демонстрирует явление компенсации встречных потоков энергии низкочастотного подводного окружающего шума (тропического ливня) и неизвестного локального подводного источника по оси y. Спектр когерентной мощности (интенсивности) на частотах f >200 Гц находится ниже спектра давления на 15–20 дБ. На этих частотах хорошо видны слабые сигналы на частотах 286 Гп и 668 Гц, т.к. окружающий шум тропического ливня, являясь диффузной компонентой, в горизонтальной плоскости «залавлен» во взаимном спектре. Спектр на частотах f < 200 Гц значительно поднят из-за шумов дальнего судоходства. На частоте ≈ 59 Гц наблюдается «провал» в спектре когерентной мощности. «Провал» составляет ≈ 30 дБ! Отметим, что в спектре давления этого сигнала не видно. Данный «провал» в спектре есть результат компенсации встречных потоков энергии, т.е. два встречных потока примерно равной мощности компенсируют друг друга, и в когерентном спектре мы видим «нуль вертикального потока мощности». На рис. 3 когерентная мощность представлена в децибельном масштабе, функция когерентности $\gamma_{PV}^2(f)$ – в линейном масштабе. Йз сопоставления этих двух функций следует вывод, что существует вторая гармоника для ~59 Ги на частоте ~120 Гц (на рис. 3 она не



Рис. 2. Компенсация вертикальных компонент плотности потока энергии окружающего динамического шума и тонального источника на частоте 402 Гц. Глубина измерения 500 м. $S_{p2}(f)$ – спектральная плотность акустического давления; $S_{PV_z}(f) = \gamma_{PV_z}^2(f)S_{p2}(f)$ – когерентная мощность (взаимный спектр) вертикальной компоненты плотности потока энергии; $\gamma_{PV_z}^2(f)$ – функция когерентности. Полоса анализа – 1 Гц, время усреднения – 60 с, усреднение экспоненциальное [1]

7

отмечена). Разность фаз $\Delta \varphi_{av}(f)$ показывает, что сигнал 59 Гц идет с направления -*y*, т.е. с направления, противоположного направлению распространения подводного окружающего шума.

Таким образом, шум дождя, который является помехой для гидрофонной антенны в случае комбинированного приема, как бы «освещает» подводную обстановку. В такой же ситуации может оказаться, например, подводная лодка, которая «прячется» под надводным судном.

3. Вихри вектора интенсивности. В случае мелкого моря при решении проблемы обнаружения возможно использовать недавно обнаруженное явление – существование знакопеременных вихрей вектора акустической интенсивности [4, 5]. В этом случае наиболее чувствительным параметром является z-компонента функции комплексной интенсивности. Возникающие в среде мелкого моря вертикальные потоки энергии от шумящего источника могут служить признаком наличия подводной цели. Фундаментальность данного явления заключается в том, что rot $I_c(t)$ не равен нулю и является знакопеременным, а именно:

rot $\vec{I}_c = \operatorname{rot}(p\vec{V}^*) = p\operatorname{rot}\vec{V}^* +$ +[grad $p \times \vec{V}^*$] = [grad $p \times \vec{V}^*$] $\neq 0$, (5) где \vec{I}_c – комплексная интенсивность.

4. Теоретическая оценка коэффициента усиления комбинированного приемника. Запишем соотношение сигнал/ шум SNR(PV) одиночного комбинированного приемника при



Рис. 3. Тональные сигналы 286 Гц и 668 Гц (отмечены стрелками) в спектрах шумов интенсивного дождя (компонента *у*). $\Delta \varphi_{ay}(f)$ – фазовый спектр давления и у-компоненты колебательного ускорения. Время усреднения спектров – 60 с, глубина измерения – 150 м. Стрелка со звездочкой указывает на частоту \approx 59 Гц, на которой наблюдается компенсация [1]

мультипликативной обработке. При этом считаем сигнал и шум стационарными гауссовскими процессами с нулевыми средними значениями и статистически независимыми:

$$SNR(PV) = \sqrt{\frac{B_0 T_0}{2}} \times \sqrt{\frac{2W_{P,S} W_{V,S}}{W_{P,N} W_{V,N} (1 + R_{P,V}^2 - J_{P,V}^2)}},$$
(6)

где $B_0 = \Delta f_0 -$ полоса частотного анализа, причем $\Delta f_0 < f_0; f_0 -$ частота тонального сигнала; T_0 время усреднения; $W_{\rm P,S}, W_{\rm V,S},$ $W_{\rm P,N}, W_{\rm V,N} -$ мощности сигналов и шумов на входе каналов акустического давления *p* и колебательной скорости *v*; $R_{\rm P,V}$ и $J_{\rm P,V}$ действительная и мнимая части нормированной взаимной корреляционной функции шума на выходе комбинированного приемника.

Если $P_{N}(t)$ и $V_{N}(t)$ – центрированные процессы в каналах p и v, то:

$$\begin{split} W_{\rm P,N} &= < |P_{\rm N}(t)|^{2} >, W_{\rm V,N} = < |V_{\rm N}(t)|^{2} >, \\ R_{P,V} &= \frac{\operatorname{Re} < P_{N}(t) \times V_{N}^{*}(t) >}{\sqrt{W_{P,N}W_{V,N}}}, \quad (7) \\ J_{P,V} &= \frac{\operatorname{Im} < P_{N}(t) \times V_{N}^{*}(t) >}{\sqrt{W_{P,N}W_{V,N}}}, \end{split}$$

где <...> – знак усреднения; (*) – обозначение комплексносопряженной величины.

В формуле (6) разделим мощности сигнала и шума на полосу анализа, т. е. $W_{\rm P,S}/\Delta f_0$, $W_{\rm V,S}/\Delta f_0$, $W_{\rm P,N}/\Delta f_0$, $W_{\rm V,N}/\Delta f_0$. Исходя из [1] определим следующие спектральные плотности при $\Delta f_0 \rightarrow 0$ и $T_0 \rightarrow \infty$: $W_{\rm P,S}/\Delta f_0 \rightarrow S_{p^2,S}$; $W_{\rm V,S}/\Delta f_0 \rightarrow S_{p^2,S}$; $W_{\rm V,S}/\Delta f_0 \rightarrow S_{p^2,S}$; $W_{\rm V,N}/\Delta f_0 \rightarrow S_{p^2,N}$. При этом $R_{\rm P,V} \rightarrow \cos\varphi_{\rm N}$ и $J_{\rm P,V} \rightarrow \sin\varphi_{\rm N}$, где $\varphi_{\rm N}$ – среднее значение разности фаз между акустическим давлением P(t) и колебательной скоростью V(t)в шуме на частоте f_0 . Пользуясь полученными выше соотношениями и теоремой о спектрах, приведем формулу (6) к виду:

$$SNR(PV) = \sqrt{\frac{B_0 T_0}{2}} \times \frac{S_{P,S}(f_0) S_{V,S}(f_0) \cos \varphi_S}{S_{P,N}(f_0) S_{V,N}(f_0) \cos \varphi_N}.$$
 (8)

В формуле (8) мы ввели $\cos\varphi_{\rm S}$ (где $\varphi_{\rm S}$ – среднее значение разности фаз между $P_{\rm S}(t)$ и $V_{\rm S}(t)$ для сигнала на частоте f_0), поскольку мы считаем сигнал случайной функцией. Выражения $S_{\rm PV,S}(f_0)S_{\rm V,S}(f_0)\cos\varphi_{\rm S} = S_{\rm PV,S}(f_0)$ и $S_{\rm P,N}(f_0)S_{\rm V,N}(f_0)\cos\varphi_{\rm N} = S_{\rm PV,N}(f_0)$ есть действительные части взаимных спектров сигнала и шума на частоте f_0 , приведенные к полосе $B_0 = 1$ Гц.

Запишем (8) в логарифмическом виде:

$$SNR(PV) = 10 \lg \sqrt{\frac{B_0 T_0}{2}} \times \frac{S_{PV,S}(f_0)}{S_{PV,N}(f_0)}.$$
(9)

Исходя из (6) получим отношение сигнал/шум для одиночного гидрофона (квадратичного детектора):

$$SNR(P^{2}) = 10 \lg \sqrt{\frac{B_{0}T_{0}}{2}} \times \frac{S_{P^{2},S}(f_{0})}{S_{P^{2},N}(f_{0})},$$
(10)

где $S_{p^2,S}(f_0)$ и $S_{p^2,N}(f_0)$ – спектральная плотность потенциальной энергии сигнала и шума, приведенная к полосе $B_0 = 1$ Гц на частоте f_0 .

Помехоустойчивость комбинированного приемника относительно квадратичного детектора:

$$SNR(PV/P^2) = \frac{SNR(PV)}{SNR(P^2)}.$$
 (11)

Выражения (9), (11) являются очень удобными при исследовании в узкой полосе частот помехоустойчивости комбинированного приемника в спектральной области.

Заменим взаимно-спектральные плотности $S_{\rm PV,S}(f_0)$ и

 $S_{_{\rm PV,N}}(f_{_0})$ когерентной мощностью сигнала и шума [1]:

$$S_{PV,S}(f_0) = \gamma_{PV,S}^2(f_0)S_{P^2,S}(f_0);$$

$$S_{PV,N}(f_0) = \gamma_{PV,N}^2(f_0)S_{P^2,N}(f_0),$$

где $\gamma_{PVS}^2(f_0)$, $\gamma_{PVN}^2(f_0)$ – функции обычной одноточечной когерентности сигнала и шума; $S_{P^2,S}(f_0)$, $S_{P^2,N}(f_0)$ – спектральные плотности мощности сигнала и шума. Тогда:

 $SNR(PV) = 10 \lg \sqrt{\frac{B_0 T_0}{2}} \times \frac{\gamma_{PV,S}^2(f_0) S_{p^2,S}(f_0)}{\gamma_{PV,N}^2(f_0) S_{p^2,N}(f_0)} =$ $= 10 \lg \sqrt{\frac{B_0 T_0}{2}} \times \frac{S_{p^2,S}(f_0)}{S_{p^2,N}(f_0)} + 10 \lg \frac{\gamma_{PV,S}^2(f_0)}{\gamma_{PV,N}^2(f_0)}.$

В формуле (12) выражение $10 \lg \sqrt{\frac{B_0 T_0}{2} \times \frac{S_{p^2,S}(f_0)}{S_{p^2,N}(f_0)}}$ есть $SNR(P^2)$ на выходе гидрофона комбинированного приемника; выражение

$$k = 10 \lg \frac{\gamma_{PV,S}^{2}(f_{0})}{\gamma_{PV,N}^{2}(f_{0})},$$
 (13)

(12)

выражению эквивалентное усиления антенной решетки 10lgN (где N – число элементов в антенной решетке), мы назовем коэффициентом усиления комбинированного приемника. Следовательно, усиление комбинированного приемника зависит от отношения функций когерентности сигнала и шума для давления и колебательной скорости частиц среды в акустическом поле. В случае гидрофонной антенны коэффициент усиления антенны показывает, в какой степени антенна подавляет изотропный шум. Эта способность антенны определяется числом элементов N в антенной решетке и когерентностью сигнала и шума в пределах апертуры данной антенны, т. е. антенна подавляет все плоские волны. приходящие с направлений, не попадающих в апертуру антенны. Комбинированный приемник обладает сферической характеристикой направленности. Сам алгоритм подавления изотропного шума при измерении вектора интенсивности основан на физическом свойстве изотропного шумового поля, которое заключается в том, что усредненный во всем телесном угле 4π вектор интенсивности в изотропном поле шумов равен нулю ($\langle \vec{I}_{u_3} \rangle = 0$). В реальном случае шумовое поле не является стационарным и содержит анизотропную составляющую. Однако эффективность подавления изотропной компоненты шума у комбинированного приемника значительно выше, чем у гидрофонной антенны с равным числом информационных каналов *N*. Следует отметить, что комбинированный приемник и гидрофонные антенны не исключают, но дополняют друг друга. Комбинированный приемник измеряет вектор плотности потока энергии акустического поля; гидрофонная антенна измеряет скалярную величину - плотность потенциальной энергии акустического поля.

2. Техника и методология комбинированных измерений

2.1. Шумы обтекания и вибрации

Основной помехой, в особенности на низких частотах, при измерениях акустических величин в океаническом волноводе являются шумы обтекания (псевдозвук) и вибрации конструкций измерительной системы, передающиеся непосредственно на векторный приемник. В случае если измерительные системы движутся относительно потока окружаю-



Рис. 4. Варианты подвески векторного приемника в дрейфующем измерительном модуле: а – однозвенная подвеска: волнение – 1 балл; дрейф –0,35уз.; h_{пс}=130м; ∆f=0,0625Гц; б–двухзвенная подвеска нейтральной плавучести: волнение – 1 балл; дрейф –0,4уз.; h_{пс}= 120 м; ∆f = 0,0625 Гц

щей жидкости, шумы обтекания при измерениях на низких частотах, как показывает эксперимент, могут достигать значительных величин. Приведем результаты натурных исследований. На рис. 4, а, б приведены инфразвуковые спектры шумов. Гидрофон Р_{шп} жестко прикреплен к каркасу 1 капсулы, в соответствии с приведенным на рисунке схематическим изображением. Гидрофон Р.,, состоящий из двух гидроакустических головок, закреплен на векторном приемнике 2, имеющем среднюю плотность 1,6 г/см³. Резонанс подвески векторного приемника на эластичных подвесках 3 в обтекателе 4 равен 1 Гц. Из сопоставления спектров видно, что на гидрофоне $\boldsymbol{P}_{_{\rm HY}}$ наблюдается значительный подъем на частоте вблизи 1,5 Гц, объясняемый резонансом подвески. Инфразвуковые спектры на рис. 4, б получены в случае, когда векторный приемник вместе с гидрофоном Р_{нч} имеет среднюю плотность 1 г/см³ (нейтральная плавучесть) и в капсуле приемник 2 установлен внутри обтянутой парашютным шелком звукопрозрачной рамки 5, подвешенной на эластичных

растяжках 3 к каркасу. Вследствие слабой упругости рамки 5 подвески ($f_{\rm pes} < 0,1$ Гц) спектр шумов звукового давления $P_{\rm Hy}$ существенно ниже, чем $P_{\rm mm}$.

Следует отметить, что введение двухзвенной системы подвески нейтральной плавучести приводит к качественно новому результату. В варианте, изображенном на рис. 4, а, жесткость крепления к каркасу капсулы приемника Р_{шп} существенно отличается от жесткости крепления приемника Р_{нч}, но это отличие практически не сказывается на уровне помех, за исключением частот, близких к резонансу подвески приемника Р_{нч}. Переход к двухзвенной подвеске нейтральной плавучести позволяет снизить инфразвуковые помехи на 10-20 дБ в область нескольких октав. На высоких частотах, где шумы обтекания не так существенны, возможно проводить измерения при скорости носителя более чем 0,5 м/с. Важную роль играет обтекатель, в который помещен комбинированный приемник.

Для изготовления обтекателя следует использовать стеклопластик. Обтекатели из стеклопластика имеют более высокие акустические характеристики, чем металлические обтекатели. Это обусловлено тем, что плотность стеклопластика (1500-1600 кг/м³) значительно меньше, чем плотность стали (7800 кг/м³) или титана (4500 кг/м³). Модуль Юнга стеклопластика примерно в 10 раз меньше, чем стали, и в 5 раз меньше, чем титана, поэтому звукопрозрачность стеклопластика обеспечивается не только изгибными (антисимметричными относительно нейтральной плоскости пластины), но и продольными (симметричными) колебаниями, что повышает звукопрозрачность при нормальном падении звуковой волны, но создает ряд особенностей при наклонном падении. Для обеспечения необходимой прочности и жесткости толщина стеклопластиковой оболочки должна быть больше, чем металлической. Однако несмотря на это эффективная звукопрозрачность стеклопластиковой оболочки оказывается выше, чем металлической. В результате уменьшаются искажения характеристик направленности антенн, вносимые обтекателем.

Для обтекателей антенн, работающих в звуковом диапазоне частот, максимально допустимая толщина обтекателя оказывается достаточной, чтобы выполнить его без ребер жесткости, что также положительно влияет на акустические характеристики.

Для обтекателей антенн, работающих на ультразвуковых частотах, толщина обтекателя должна быть меньше, и стеклопластиковую обшивку необходимо подкреплять набором ребер жесткости. Обычно применяются ажурные (ферменные) ребра жесткости, причем одна из сторон фермы заформовывается в стеклопластик. Коэффициент механических потерь (мнимая часть модуля Юнга) у стеклопластика равен 0,02, в то время как у металлов эта величина составляет 10-3-10-4. Поэтому стеклопластик демпфирует вибрации, распространяющиеся по оболочке, и обеспечивает лучшую помехозащищенность.

2.2. Современные приемные комбинированные системы, разработанные и созданные в лаборатории акустических шумов океана ТОИ ДВО РАН (краткий обзор)

Для проведения фундаментальных исследований подводного окружающего шума, интерференционных и реверберационных полей в лаборатории акустических шумов океана ТОИ ДВО РАН были созданы различные типы приемных комбинированных систем. Разработка техники, методологии подводных акустических исследований ведется с 1980 г.

Акустические комбинированные системы могут быть стационарными – это донные или находящиеся в водном слое, закрепленные за дно, а также автономные свободно дрейфующие многоканальные приемные системы. На рис. 5 представлены различные типы таких систем.

На рис. 6 изображен комбинированный модуль нейтральной плавучести свободно дрейфующей приемной многоканальной системы, созданной для исследований шумов и слабых сигналов в глубоком открытом океане и мелком море.

Четырехкомпонентный комбинированный приемник, размещенный в корзине обтекателя, приведен на рис. 7. Диаметр сферы векторного приемника равен 200 мм. Плотность сферы – 2 г/см³, приемник имеет отрицательную плавучесть. Максимальная глубина погружения до 1000 м. Приемник является приемником градиента давления.

Техника и методология комбинированных систем, разработанная и созданная в ТОИ ДВО РАН, позволила в условиях реального океана (при состоянии поверхности океана от глубокого штиля до шторма при скорости ветра до 15–18 м/с) провести исследования акустических полей подводного окружающего шума и сигнала и обнаружить явления, изложенные в разделе 1. Следует отметить, что комбинированные однородные приемники в последнее время внедряют в практику измерительных систем [6].

выводы

Многолетние фундаментальные исследования (ТОИ ДВО РАН, 1979-2012 гг.) векторных свойств акустических полей подводного окружающего шума и сигнала указывают на возможность на основе обнаруженных свойств построить алгоритмы обнаружения слабошумящих целей в условиях мелкого и глубокого моря. Система может работать как в пассивном, так и в активном режимах. По своему принципу действия такие системы принципиально отличаются от существующих гидрофонных систем обнаружения и фактически относятся к системам обнаружения нового поколения. Основные свойства векторных акустических полей могут быть использованы для разработки новых алгоритмов обнаружения малошумных целей как в мелком, так и в глубоком морях. Построение мобильных акустических систем на основе автономных необитаемых



Рис. 5. Различные типы приемных комбинированных акустических систем: а – донные системы, b – автономные дрейфующие системы. 1 – измерительный модуль, 2 – донный якорь, 3 – кабель, 4 – плавучести, 5 – радиобуй, 6 – излучатель, 7 – груз, 8 – научное излучающее и приемное судно, 9 – научная береговая база [1]



Рис. 6. Комбинированный акустический приемный модуль. 1 – трехкомпонентный приемник колебательной скорости; 2 – резиновые лонжи; 3 – ограничитель подвески; 4 – гидрофоны; 5 – крепления положительной плавучести; 6 – положительная плавучесть; 7 – регулятор дифферента; 8 – контейнер с предусилителями; 9 – кабель; 10, 11 – плавучести; 12 – кабельная разводная коробка; 13 – обтекатель; 14 – полипропиленовый фал; 15 – маленькие поплавки из сферопластика

подводных аппаратов (АНПА) является вполне возможным, поскольку векторный приемник имеет ограниченный объем (сфера радиусом ~ 0,3 м), а вес приемника на воздухе не превы-



Рис. 7. Одиночный комбинированный четырехкомпонентный приемник в корзине обтекателя

шает 10 кг. Рабочий диапазон частот включает как область инфразвука, так и область высоких частот от 1 Гц до 10 кГц. При низких уровнях собственных шумов современных подводных лодок мобильные системы обнаружения, в отличие от стационарных систем, могут не только обнаружить цель, двигаясь по определенной программе в заданном районе, но и сопровождать цель или двигаться самостоятельно в зону достоверного обнаружения. Мобильные комбинированные системы могут быть использованы при измерении шумности морских объектов, если будут иметь систему измерения дистанции.

В мелком море обнаружение слабошумящих целей в режиме шумопеленгования средствами гидрофонных систем становится невозможным, поскольку шумность современных подводных лодок неуклонно снижается. Однако проблему обнаружения слабошумящих целей можно решить либо с помощью барьерных линий на основе комбинированных акустических систем, либо путем использования мобильных платформ на основе необитаемых подводных аппаратов (АНПА) или планеров – глайдеров, оснащенных комбинированными акустическими системами, в которых будут использоваться алгоритмы, изложенные в данной работе и в [7]. Вариант использования барьерных линий на основе комбинированных акустических систем является более трудоемким и затратным, тогда как вариант использования мобильных платформ на основе АНПА, оснащенных комбинированными акустическими системами, безусловно, представляется более перспективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 307 с.

2. D'Spain G.L, Hodgriss W.S., Edmonds G.L. Energetics of the deep ocean's infrasonic sound field // J. Acoust. Soc. Amer. 1991. Vol. 89, No. 3. P. 1134-1158.

3. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.

4. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 837-843.

5. Щуров В.А., Черкасов А.В., Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Аномальные особенности структуры поля вектора интенсивности в акустических волноводах // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2 (12). С. 4–17.

6. Красовский П., Цыганков С., Теверовский Г. Проблемы измерения гидроакустических характеристик морских объектов // Военно-морской салон. С-Петербург, 2011. С. 20–24.

7. Подводный планер для мониторинга векторных акустических полей: Пат. 106880 U1 Российская Федерация. № 2011108806; заявл. 09.03.11; опубл. 27.07.11, Бюл. № 21.