

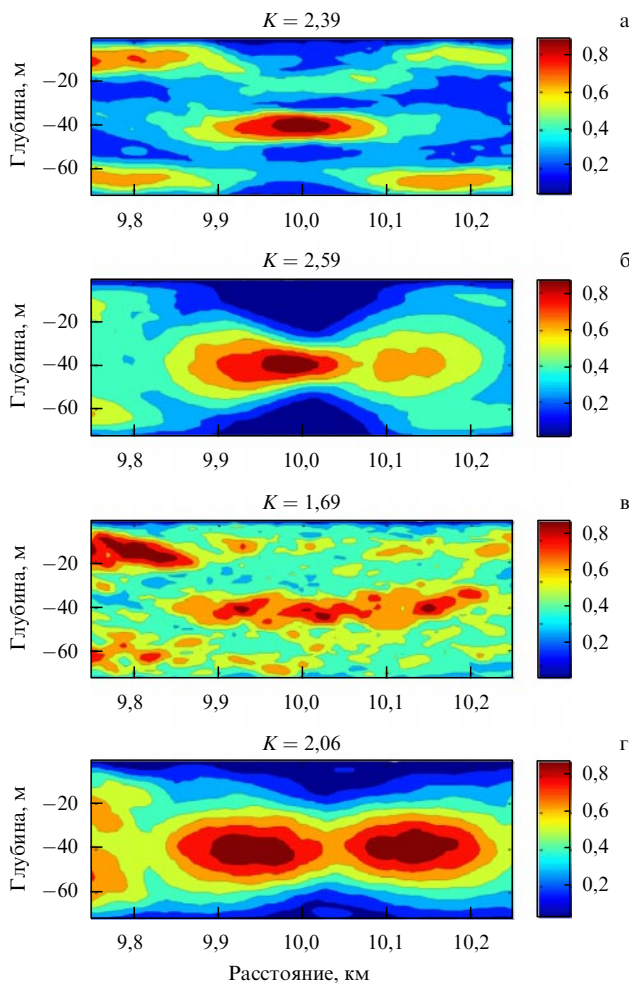


Рис. 6. Фокусировка звука с помощью ВОВ при наличии поверхностного волнения (численное моделирование): (а) $V = 9 \text{ м с}^{-1}$, одиночный трансивер на глубине 9 м; (б) $V = 9 \text{ м с}^{-1}$, фокусирующая вертикальная антенна; (в) $V = 12 \text{ м с}^{-1}$, одиночный трансивер на глубине 9 м; (г) $V = 12 \text{ м с}^{-1}$, фокусирующая вертикальная антенна.

ного звукового канала. Распространяющиеся в таком канале придонные волноводные моды слабо взаимодействуют с морской поверхностью. Численное моделирование показывает, что в этой ситуации устойчивая фокусировка звука возможна на расстоянии в несколько десятков километров при той же скорости ветра, $V \approx 12 \text{ м с}^{-1}$. Для этого с помощью вертикальных антенн необходимо выделить отдельные волноводные моды и использовать для фокусировки звуковое поле с заданным модовым составом.

Фоновые внутренние волны (ВВ), существующие, как правило, в летнее время, также в значительной степени ухудшают качество фокусировки с течением времени. Особенно заметно такое ухудшение в открытых районах океанского шельфа (например, в Атлантическом шельфе США, Тихоокеанском шельфе в районе Камчатки), где интенсивность ВВ достаточно велика. Численные эксперименты с использованием пространственно-временных спектров ВВ, зарегистрированных в этих районах, показали, что уже на расстоянии 20 км фокусное пятно расплывается и "уходит" из места расположения ПИ под действием внутренних волн. Такие изменения в фокусном пятне происходят по истечении времени корреляции поля ВВ, составляющего несколько часов.

4. Заключение

Таким образом, сфокусированное акустическое поле на морском шельфе обладает рядом весьма необычных физических свойств, открывающих широкие возможности для его практического использования. Кратко перечислим сферы возможного применения сфокусированного звука:

- крупномасштабный акустический мониторинг морского шельфа, основанный на измерениях частотных смещений интерференционных максимумов звукового поля (включая максимумы, образующиеся при фокусировке) в частотной области [8];
- дальняя звукоподводная связь, для которой фокусировка не только даёт выигрыш в отношении сигнал/шум в точке приёма, но и является эффективным методом подавления многолучевого приёма [9];
- акустическая томография мелкого моря, в которой за счёт фокусировки оказывается возможным подавить дальнюю реверберацию [10, 11].

Результаты исследований авторов, представленные в настоящем сообщении, получены при поддержке РФФИ (проекты 08-02-00283, 10-02-01019, 11-02-00779).

Список литературы

1. Даргейко М М и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **27** 746 (1984) [Dargeiko M M et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **27** 516 (1984)]
2. Fink M et al. *Rep. Prog. Phys.* **63** 1933 (2000)
3. Зверев В А *Избранные труды* (Н. Новгород: ИПФ РАН, 2004)
4. Kuperman W et al. *J. Acoust. Soc. Am.* **103** 25 (1998)
5. Зверев В А, Коротин П И, Стромков А А *Акуст. журн.* **54** 69 (2008) [Zverev V A, Korotin P I, Stromkov A A *Acoust. Phys.* **54** 58 (2008)]
6. Луньков А А, Петников В Г, Стромков А А *Акуст. журн.* **56** 256 (2010) [Lunkov A A, Petnikov V G, Stromkov A A *Acoust. Phys.* **56** 228 (2010)]
7. Кузькин В М и др. *Акуст. журн.* **52** 74 (2006) [Kuz'kin V M et al. *Acoust. Phys.* **52** 65 (2006)]
8. Кузькин В М, Переселков С А *Акуст. журн.* **53** 833 (2007) [Kuz'kin V M, Pereselkov S A *Acoust. Phys.* **53** 736 (2007)]
9. Edelmann G F et al. *IEEE J. Ocean. Eng.* **27** 602 (2002)
10. Kim S et al. *J. Acoust. Soc. Am.* **115** 1525 (2004)
11. Переселков С А, Петников В Г *Акуст. журн.* **53** 400 (2007) [Pereselkov S A, Petnikov V G *Acoust. Phys.* **53** 348 (2007)]

PACS numbers: **43.20. + g**, **43.30. + m**, 43.60.Pt
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201111.1222

Маломодовая акустика мелкого моря

А.Г. Лучинин, А.И. Хилько

1. Введение

Освоение ресурсов северного шельфа и мелководных окраинных морей требует создания информационного гидроакустического (ГА) обеспечения, в том числе для решения как задач гидроакустической связи, так и задач подводного наблюдения. Указанные задачи являются традиционными для гидроакустики, однако долгое время они решались в основном для относительно небольших дистанций (1–10 км), при которых

А.Г. Лучинин, А.И. Хилько. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, РФ
E-mail: Luch@hydro.appl.sci-nnov.ru, A.khil@hydro.appl.sci-nnov.ru

эффективным являлось использование высокочастотных звуковых волн [1].

Новым этапом развития гидроакустики явилось использование низкочастотного (НЧ) звука для обеспечения решения информационных задач для больших дистанций (до 10^3 км и более) в глубоком море. Исследование таких ГА-систем за рубежом было начато В. Манком с коллегами [2] с 70-х годов прошлого столетия. В конце 1970-х годов к исследованиям активно подключились отечественные учёные под руководством А.В. Гапонова-Грехова. В короткие сроки ими были развиты основы НЧ-гидроакустики, созданы уникальные низкочастотные гидроакустические (НЧГА) излучатели и проведены эксперименты, в которых в глубоководных ГА-каналах были измерены дифрагированные НЧГА-сигналы при рекордно больших дистанциях наблюдения [3].

В конце 1980-х годов в связи с возросшим интересом к освоению морского шельфа появилась насущная необходимость проведения ГА-наблюдений в протяжённых районах мелкого моря, где взаимодействие ГА-поля с поверхностью и дном является существенным, в результате чего поле сильно затухает и теряет когерентность [4], кроме того, формируется высокий уровень реверберационных помех [5]. Особенно сильно эти эффекты проявляются для интерференционной многомодовой части НЧГА-импульсов, которая, как показывают измерения, является неустойчивой во времени и быстро затухает. Поэтому предпринимавшиеся попытки использования одиночных монополюсных источников для дальней НЧ-гидролокации в мелком море, повышения их мощности, применения больших приёмных решёток не помогли существенно продвинуться в решении проблемы.

2. Модовая тень

и томографическая реконструкция неоднородностей

Идея решения задачи создания информационного ГА-обеспечения возникла при её обсуждении с А.В. Гапоновым-Греховым, В.И. Талановым, В.А. Зверевым и В.В. Коваленко в 1995–1996 гг. Эта идея состояла в использовании для акустической подсветки водной толщи лишь хорошо распространяющихся НЧ-волноводных (200–400 Гц) мод в мелком море (в большинстве случаев это моды с низкими номерами) и их селективного приёма. Этот подход известен в оптике и радиофизике, однако в акустике океана он не применялся.

Как показали оценки, такое маломодовое поле, благодаря относительно слабому затуханию, при одной и той же подводимой энергии к излучающему комплексу должно иметь большую интенсивность, чем многомодовое поле. Кроме того, использование маломодовых ГА-полей могло бы позволить ослабить реверберацию в целом и, в частности, понизить корреляционные помехи от сигнала прямой засветки, если принимать моды других номеров (также заимствованный из оптики принцип тени, но в рассматриваемом случае — модовой).

Дальнейший анализ показал, что, используя при ГА-наблюдении согласованные с волноводом модовые сложно модулированные импульсы в мелком море, можно не только обеспечить дальнюю подводную связь, но и реализовать ГА-локацию с предельными дистанциями наблюдения. Для того чтобы лучше осветить подводную обстановку в зонах большой протяжённости, кроме того, был привлечён метод мультистатиче-

ского (томографического) наблюдения, в котором результирующее изображение объекта формируется совокупностью проекций.

С учётом всех перечисленных принципов, определяющих понятие маломодовой акустики мелкого моря, был предложен метод маломодовой импульсной томографии (МИТ), принципы которой состоят в следующем. С помощью набора вертикально развитых решёток S_i ($i = 1, \dots, I$) возбуждаются импульсные сигналы, соответствующие моде с номером n , с достаточно узкой в плоскости параметров "частота – время" функцией неопределённости. При этом строение волновода и структура мод предполагаются известными.

Разумеется, возбудить только одну моду практически невозможно вследствие конечности апертуры излучающей решётки и невозможности поместить излучатели в грунт. Поэтому необходимо создать такое распределение на излучающей апертуре, при котором все излучаемые моды были бы существенно меньше одной согласованно возбуждаемой моды [6, 7]. В этом случае излучаемый сигнал можно считать маломодовым. Рассеянные наблюдаемой неоднородностью импульсы, соответствующие модам с номерами $m = 1, \dots, M$, где M — полное число распространяющихся в волноводе мод, принимаются с помощью набора вертикально развитых приёмных решёток R_j ($j = 1, \dots, J$). Для каждой из селективируемых при приёме мод осуществляется согласованная фильтрация импульсов с перебором задержек времени τ и доплеровских смещений частоты Ω . Число и положение источников и приёмных систем, а также количество соответствующих каждой паре "источник – приёмная система" модовых томографических проекций может варьироваться.

Таким образом, принятый сигнал для каждой из пар излучающей и приёмной решёток является функцией нескольких переменных: номеров возбуждаемых и принимаемых мод, а также задержек и доплеровских смещений частоты.

В результате совместной обработки всех пространственных модовых и частотных томографических проекций определяются пространственные и временные параметры наблюдаемых неоднородностей. Вдали от источника в ГА-волноводах поле представляет собой конечную сумму N распространяющихся мод (для горизонтально однородных волноводов число мод у источника и приёмника одинаково и $N \equiv M$). Мода характеризуется собственными функциями $\varphi_n(z)$ и комплексными собственными числами $h_n(\omega)$ с мнимыми частями, определяющимися декрементами затухания мод $\delta_n(\omega)$. Каждый i -й источник томографической системы, представляющий собой решётку излучателей длиной L_i , возбуждает последовательность узкополосных зондирующих импульсов $f_0(t)$, спектр которых $F(\omega - \omega_0)$, где ω_0 — несущая частота. Если глубина и размеры излучающих решёток подобраны оптимально, то излучаемый маломодовый сигнал будет состоять из излучаемой моды с номером n , уровень которой максимально превышает уровни всех остальных мод [6]. Тогда в предположении малости эффектов внутримодовой дисперсии (это накладывает ограничения на полосу излучаемых импульсов, а также на расстояния, на которых они наблюдаются) после согласованной фильтрации прямой (нерассеянный) импульсный сигнал с j -й приёмной решётки длиной L_j можно пред-

ставить в следующем виде:

$${}^0P_{ij}^{nm}(r_{ij}, \tau_{ij}^{nm}, \Omega_{ij}^{nm}) = A_n^i A_m^j \exp \left[i \left(h_n r_{ij} - \frac{\pi}{4} \right) \right] (h_n r_{ij})^{-1/2} F_{\text{ind}}(\tau_{ij}^{nm}, \Omega_{ij}^{nm}) + \sum_{\substack{\eta \neq n \\ \mu \neq m}}^M A_\eta^i A_\mu^j \exp \left[i \left(h_\eta r_{ij} - \frac{\pi}{4} \right) \right] (h_\eta r_{ij})^{-1/2} F_{\text{ind}}(\tau_{ij}^{\eta\mu}, \Omega_{ij}^{\eta\mu}), \quad (1)$$

где $h_n = h_n(\omega_0)$, $\tau_{ij}^{nm} = r_{ij}/v_n(\omega_0)$ — задержка импульса, соответствующего n -й моде в приёмном канале, соответствующем моде с номером m ; $v_n(\omega_0)$ — групповая скорость n -й моды; Ω_{ij}^{nm} — доплеровское смещение частоты, возникающее вследствие движения рассеивателя; $A_{n,m}^{i,j} = \int_0^{L_{i,j}} g_{n,m}^{i,j}(z) \varphi_{n,m}(z) dz$ — коэффициенты возбуждения мод соответственно излучающей и приёмной решётками; $g_{n,m}^{i,j}(z)$ — оптимальные весовые множители вдоль апертур решёток [8]; $F_{\text{ind}}(\tau, \Omega)$ — функция неопределённости зондирующих импульсов,

$$F_{\text{ind}}(\tau, \Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega F(\omega) F_0(\omega - \Omega) \exp [i(\omega - \Omega)\tau],$$

$F_0(\omega)$ — спектр реплики зондирующего сигнала.

При идеальной, но недостижимой в реальных условиях пространственной фильтрации, при которой на апертурах решёток выполняются условия ортогонализации мод, в правой части (1) исчезает второе слагаемое в виде суммы малых по величине интерферирующих мод и остаётся только первое слагаемое, соответствующее полю акустической подсветки для одной излучаемой моды.

При наблюдении измеряются зондирующие импульсы, испытывающие дифракцию на наблюдаемых неоднородностях волновода. В рамках модового описания комплексные амплитуды дифрагированных волноводных мод определяются матрицей рассеяния, которая зависит от внутреннего строения, формы и расположения неоднородностей [5–7]. При акустической подсветке неоднородностей импульсным сигналом, соответствующим n -й моде, амплитуда каждого из импульсов дифрагированных мод с индексом m будет формироваться в результате рассеяния сигналов на всех неоднородностях, находящихся в пределах соответствующего импульсного объёма, точки которого r' удовлетворяют условию $|t - r_{1i}v_n^{-1} + r_{2j}v_m^{-1}| < \Delta\tau/2$, где $r_{1i} = |r_i - r'|$ и $r_{2j} = |r' - r_j|$ — расстояния от рассеивателя до источника и до приёмника соответственно. В общем случае наблюдаемые неоднородности являются движущимися, так что рассеянные импульсы имеют доплеровский сдвиг частот.

Для рассматриваемых узкополосных импульсов подсветки при относительно малых скоростях перемещения рассеивателей V_s в отдельный канал по оси доплеровских смещений попадут все рассеиватели, удовлетворяющие условию

$$|\omega_0 V_s(r') (v_n^{-1} \cos \alpha_i(r_i, r') - v_m^{-1} \cos \beta_j(r_j, r'))| < \Delta\Omega,$$

где $\alpha_i(r_i, r')$ и $\beta_j(r_j, r')$ — соответственно углы между направлением вектора скорости перемещения элементарного рассеивателя в точке r' и радиусами-векторами, построенными из точки расположения рассеивателя в источник и приёмную систему. Величины $\Delta\tau$ и $\Delta\Omega$

определяются шириной функции неопределённости $F_{\text{ind}}(\tau, \Omega)$ зондирующих импульсов соответственно по оси временных задержек и доплеровских смещений частоты.

При цифровой обработке сигналов в каждой из плоскостей "задержка–доплеровское смещение частоты", соответствующих паре мод — излучаемой с номером n и принимаемой с номером m , можно ввести для каждой пары источник–приёмник (i, j) набор каналов, соответствующих интервалам временных задержек ${}^0t_{ij}^{nm} + (l-1)\Delta\tau < \tau_{ij}^{nm} < {}^0t_{ij}^{nm} + l\Delta\tau$ и доплеровских смещений частоты $(k \mp 1)\Delta\Omega < \Omega_{ij}^{nm} < k\Delta\Omega$, где $l = 1, 2, \dots, L$ и $k = \pm 1, 2, \dots, \pm K$ — номера каналов, ${}^0t_{ij}^{nm}$ — начальные значения временных задержек, фиксированные для каждой из томографических проекций (i, j, n, m) .

После обработки, заключающейся в операции согласованной фильтрации принимаемых модовых импульсов, с учётом определённой выше дискретизации в общем случае будем иметь $I \times J \times N \times M \times K \times L$ томографических проекций, сигналы которых являются интегральными характеристиками всех неоднородностей, находящихся в пределах импульсных объёмов каждой из проекций. Совместная обработка сигналов этих проекций обеспечивает реконструкцию дифференциальных характеристик наблюдаемых неоднородностей, т.е. распределение их параметров в области наблюдения. В предположении малости эффектов многократного рассеяния амплитуды мод, рассеянных отдельными элементами импульсного объёма, определяются компонентами пространственного спектра неоднородностей, удовлетворяющими условию резонансного рассеяния: $\mathbf{k}_{ij}^{nm} = h_n \mathbf{r}_{1i}/r_{1i} - h_m \mathbf{r}_{2j}/r_{2j}$.

Наблюдаемые амплитуды давления акустического поля будут представлять собою сумму поля акустической подсветки ${}^0p_{ij}^{nm}$, компонент поля ${}^\sigma p_{ij}^{nm}$, дифрагированных на наблюдаемой неоднородности, и ${}^R p_{ij}^{nm}$, рассеянных всеми мешающими неоднородностями, а также поля источников аддитивного шума океана ${}^N p_j^{nm}$. В общем случае каждую из компонент принимаемого поля следует рассматривать как случайный сигнал с определёнными присущими им статистическими свойствами.

В предположении, что интерференционные эффекты малы, при оценке интенсивности принимаемого сигнала усреднение осуществляется по статистическим ансамблям соответствующих случайных неоднородностей и шумов. Если случайные неоднородности относительно слабы или протяжённость томографических трасс невелика, то поле акустической подсветки можно приближённо считать когерентным. При подсветке модой с номером n интенсивности компонент сигнала с выхода согласованного фильтра, соответствующих импульсам m -й принимаемой моды, которые дифрагированы неоднородностями, как наблюдаемыми (с индексом σ), так и мешающими (с индексом R), определяются матрицей рассеяния мод [5–7]:

$$\begin{aligned} ({}^{\sigma, R} I_{nm}^{v\mu})_{ij}(\tau_{ij}^{nm}, \tau_{ij}^{v\mu}, \Omega_{ij}^{nm}, \Omega_{ij}^{v\mu}) &\simeq \\ &\simeq \frac{8}{\pi h_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_{1i} r_{2j}} \exp [i(h_v - h_n)r_{1i} + i(h_\mu - h_m)r_{2j}] \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} {}^{\sigma, R} W_{nm}^{v\mu} \left(\frac{h_v + h_n}{2} \frac{\mathbf{r}_{1i}}{r_{1i}} - \frac{h_\mu + h_m}{2} \frac{\mathbf{r}_{2j}}{r_{2j}}; \omega', r' \right) \times \end{aligned}$$

$$\times F_{\text{ind}}\left(\tau_{ij}^{nm} - \frac{r_{1i}}{v_n} - \frac{r_{2j}}{v_m}; \omega' - \Omega_{ij}^{nm}\right) \times \\ \times F_{\text{ind}}^*\left(\tau_{ij}^{vm} - \frac{r_{1i}}{v_v} - \frac{r_{2j}}{v_\mu}; \omega' - \Omega_{ij}^{vm}\right) d\omega' d^2r', \quad (2)$$

где h_0 — волновое число на оси канала для несущей частоты, ${}^{\sigma, R}W_{nm}^{vm}(\mathbf{k}, \omega, r)$ — соответствующие компоненты локального спектра функции корреляции неоднородностей по разностным переменным для суммы поверхностных, донных, объёмных и пространственно локализованных неоднородностей. Интегрирование в (2) осуществляется по горизонтальным координатам, при этом глубина расположения неоднородностей учитывается при вычислении компонент локального спектра неоднородностей [6, 7].

3. Имитационная модель для адаптации к условиям наблюдения

Томографическая реконструкция заключается в оценке значений наблюдаемых параметров модели, описывающей объект. В частности, в случае пространственно локализованной неоднородности в качестве наблюдаемых параметров могут выступать координаты и форма неоднородности, а также её скорость и направление перемещения. Когда объектом наблюдения является ветровое волнение, измеряемыми параметрами могут быть скорость и направление вызывающего волнение ветра [5, 6].

Обозначим набор наблюдаемых параметров модели объекта вектором $\mathbf{p}$. Значения компонент вектора $\mathbf{p}$ оцениваются методом статистической проверки гипотез, определяемых решением прямой задачи дифракции с использованием априорной информации в виде моделей среды, объекта наблюдения, уровня помех и шумов, а также модели, описывающей конфигурацию системы наблюдения. Решение соответствует глобальному минимуму невязки между векторами измеряемых параметров $\mathbf{q}$ и векторами $\mathbf{q}^{(p)}$, соответствующими перебираемым гипотезам, например, в виде Lp -нормы:

$$\Psi(\mathbf{p}) \equiv \|\mathbf{q} - \mathbf{q}^{(p)}\|^\eta \rightarrow \min_{\mathbf{p}} \Psi(\mathbf{p}).$$

Правило принятия решения о справедливости гипотезы о значении вектора $\mathbf{q} = \mathbf{q}^{(p)}$ обычно имеет вид $\|\mathbf{q} - \mathbf{q}^{(p)}\|^\eta < \sigma$, где норма $\|\cdot\|$, показатель степени η и пороговые значения σ в общем случае определяются распределением плотности вероятностей вектора измеряемых параметров, заданными значениями вероятностей ошибок первого и второго рода при принятии решения, шумами и помехами и другими факторами.

Формирование и проверка гипотез о значениях параметров объекта (в частности, об его положении в зоне наблюдения) включает в себя определение адаптированных к условиям зондирования оптимальных пространственно-частотных апертурных распределений [8], решающих статистик и критериев для каждой томографической проекции. Кроме того, необходимо построить оптимальные алгоритмы накопления проекций и определить траекторию поиска решений (перебора гипотез).

Для решения указанной задачи была разработана имитационная компьютерная модель, включающая в себя геоинформационные базы океанологических данных, физические модели формирования сигналов и помех и алгоритмы частично-когерентного накопления и принятия решения, представляющая собой программно-алгоритмический комплекс с интерфейсом для интерактивного управления [6–10]. Результаты вычислений представляются в виде распределений вероятностей наблюдения при заданных вероятностях ложных тревог в рассматриваемом районе мелкого моря, в зависимости от условий наблюдения (ветра, течений, шумов судоходства и т.д.).

Примером анализа возможностей применения маломодовой акустики в мелком море являются расчёты для выполняющей наблюдение айсберга системы из трёх приёмно-излучающих (ПИ) решёток, которые расположены в вершинах равностороннего треугольника со стороной 100 км (на рис. 1а ПИ-модули обозначены тёмными точками). Несущая частота зондирующих узкополосных импульсов принималась равной 200 Гц. Если часть компонент вектора наблюдаемых параметров, в частности скорость и направление движения айсберга, фиксированы, то наблюдение сведётся к оценке положения айсберга. При анализе полагалось, что айсберг движется со скоростью $1,5 \text{ м с}^{-1}$ вдоль набора

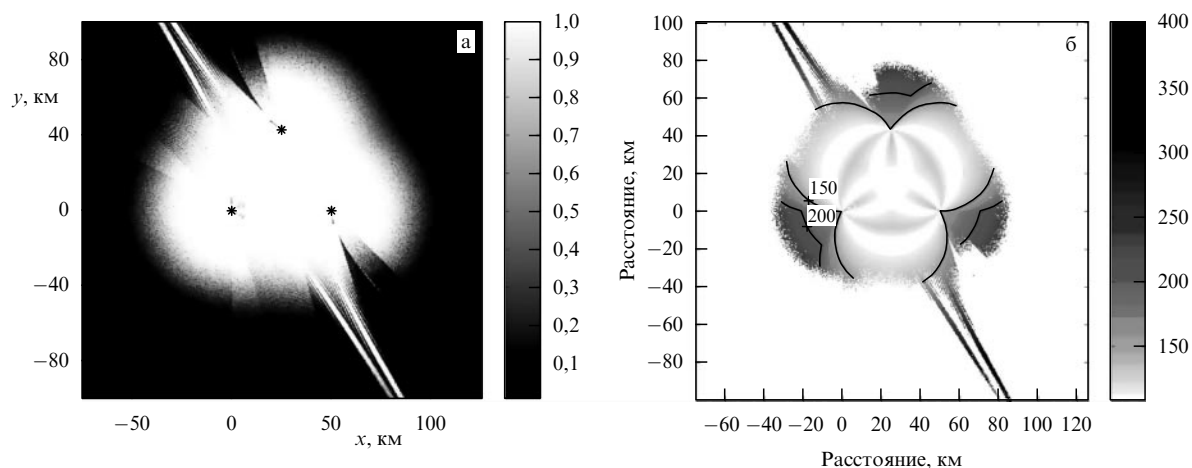


Рис. 1. (а) Суммарное поле зрения в горизонтальной плоскости при возбуждении десяти модовых и девяти пространственных проекций при уровне шума 82 дБ. (б) Соответствующее рис. а распределение значений пространственного разрешения при возбуждении первой моды и приёме третьей. Яростная шкала и значения пространственного разрешения у изолиний приведены в метрах.

траекторий, каждая из которых составляет угол $\pi/4$ с осью x (рис. 1а). Уровень аддитивных шумов принимался равным 70 дБ относительно 1 мкПа. Мощность источника акустической подсветки выбиралась равной 100 Вт. Как видно из результатов расчётов, представленных на рис. 1б, поле зрения системы является неизоплавающим и существенно зависит от условий наблюдения, таких как уровень и структура шумов и помех, структура волновода, а также от параметров движения наблюдаемой неоднородности. Как следует из численного анализа, чаще всего внешняя граница поля зрения определяется аддитивными шумами, в то время как реверберационная помеха от случайных неоднородностей волновода обуславливает неоднородность поля зрения, формируя внутри него области плохой видимости.

При изменении скорости и траектории движения наблюдаемой неоднородности, а также параметров волнения форма поля зрения может существенно измениться. В частности, если айсберг перемещается вдоль трассы бистатистического наблюдения, то области, в которых донная реверберация затрудняет наблюдение, будут располагаться под прямым углом к линии источник – приёмник.

Как показало численное моделирование, система мультистатистического маломодового наблюдения позволяет осуществлять наблюдение не только пространственно локализованных, но и случайно распределённых неоднородностей, например ветрового волнения, а также характеристик ГА-волновода [6, 7, 9]. Приведённые выше и другие результаты исследований показывают, что модовая акустика океана позволяет обеспечить наблюдение в пределах зон большой протяжённости при минимальном числе ПИ-модулей и минимальных требованиях к энергообеспечению.

4. Морские эксперименты по маломодовой акустике мелкого моря

Численное моделирование позволило построить облик оптимальной системы маломодовой акустики в конкретных районах мелкого моря и разработать методику морских испытаний метода. Для осуществления экспериментов под руководством Б.Н. Боголюбова и П.И. Коротина были созданы уникальные излучающие и приёмные комплексы, включающие в себя вертикально



Рис. 2. Установка 16-элементного излучающего комплекса в подводное положение с борта научно-исследовательского судна.

ориентированные излучающие и приёмные НЧГА-решётки. В частности, с использованием эффективных лёгких и малогабаритных НЧ-излучателей электромагнитного типа была построена 16-элементная решётка с системой адаптивного управления (рис. 2). Кроме того, были созданы уникальные НЧГА-приёмные комплексы в составе 100-метровой решётки цифровых гидрофонов с большим динамическим диапазоном, способные работать в автономном режиме до 7 сут [6, 7]. Апертурные распределения решёток выбирались адаптивно к изменяющейся из-за волнения и дрейфа конфигурации решёток, а также к гидрологии. Для излучающей решётки был разработан специальный итерационный алгоритм, который позволял в реальном времени формировать согласованные с ГА-волноводом модовые импульсы акустической подсветки с учётом компенсации взаимодействия излучателей через морскую среду [6, 7, 11, 12].

После создания оборудования и методик был проведён ряд морских экспериментов, целью которых являлась проверка реализуемости и эффективности маломодовой акустики мелкого моря. В результате экспериментов удалось, во-первых, продемонстрировать работоспособность оборудования и возможность компенсации

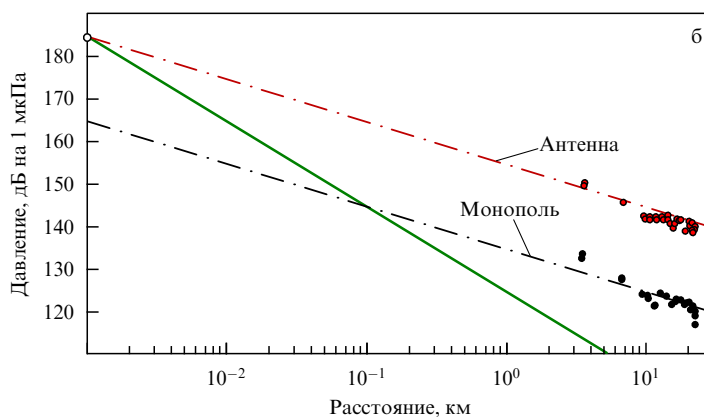
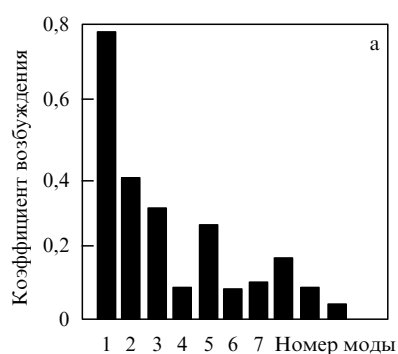


Рис. 3. (а) Модовый спектр сигнала, принятого с равномерным амплитудно-фазовым распределением на расстоянии 10 км от излучающей решётки, находящейся в интервале глубин от 44 до 89 м. (б) Зависимость уровней сигнала от дистанции для излучающей антенны и монополя. Штрих-пунктирные линии соответствуют цилиндрическому закону спада, сплошная линия отвечает сферическому закону спада. Кружком на оси ординат обозначен уровень излучаемого сигнала, одинаковый для одного монополя и для решётки излучателей.

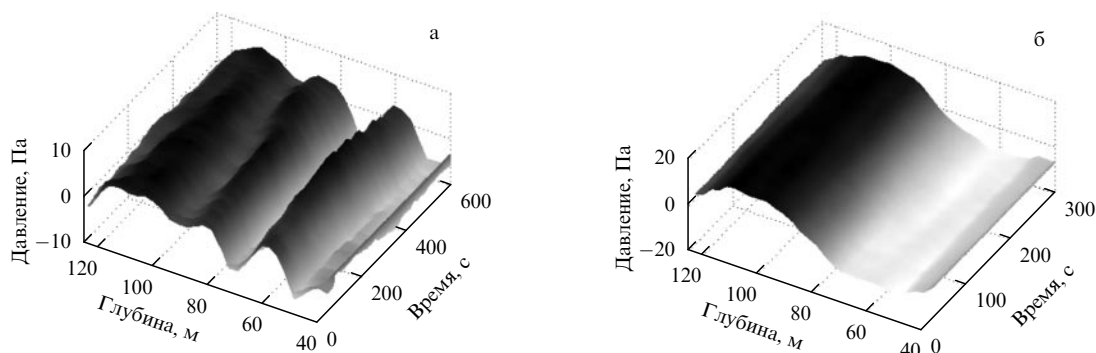


Рис. 4. Распределение поля по глубине в зависимости от времени при излучении монополя в составе антенны (а) и при однородном АФР на апертуре излучающей антенны (б). Дистанция наблюдения 4 км.

взаимодействия излучателей при возбуждении и приёме маломодовых импульсов (рис. 3). Уровень концентрации энергии при использовании согласованного с волноводом возбуждения маломодового поля в экспериментах оказался близким расчётному (7–10 дБ). Это проявилось и в существенном уменьшении переходного расстояния для решётки по сравнению с таковым для одиночного излучателя (рис. 3б). Кроме этого, маломодовое поле оказалось существенно более стабильным во времени (15–30 мин), чем поле одиночного излучателя (рис. 4).

При приёме маломодовых импульсов на больших расстояниях (свыше 100 км) была продемонстрирована высокая когерентность сигналов, что обеспечило их пространственное и частотное, согласованное с волноводом, когерентное накопление в полосе порядка 10–20 Гц для апертур протяжённостью более 1 км. Экспериментально продемонстрировано и существенное ослабление уровня поверхностной и донной реверберации (более чем на 10–15 дБ) по сравнению с таковым в случае одного излучателя и многомодового поля (рис. 5). Также экспериментально установлено, что основным источником НЧГА-шума являются удалённые штормы и шумы судоходства для мод с низкими номерами, а также шумы ветрового волнения, проявляющиеся в большей степени для мод с более высокими номерами. В расчётах и экспериментах было также показано, что уменьшение размеров решёток приводит к существенному (в несколько десятков раз) уменьшению площади зоны уверенного наблюдения [6–9].

5. Заключение

В результате проведённых исследований разработаны основы новой, обеспечивающей эффективное ГА-мультистатистическое наблюдение в мелком море, технологии, которая может рассматриваться как базовая для решения задач освоения мелководных окраинных морей России, в частности Арктического шельфа. Дальнейшее развитие этой технологии связывается с перспективами использования в её составе автономных и развёртываемых приёмно-излучающих модулей и элементов звукоподводной связи. Представляются также важными исследования, направленные на разработку адаптивных алгоритмов наблюдения, основанных на когнитивных методах.

При дальнейшем развитии и внедрении методов маломодовой акустики ключевыми являются два направления фундаментальных и прикладных исследова-

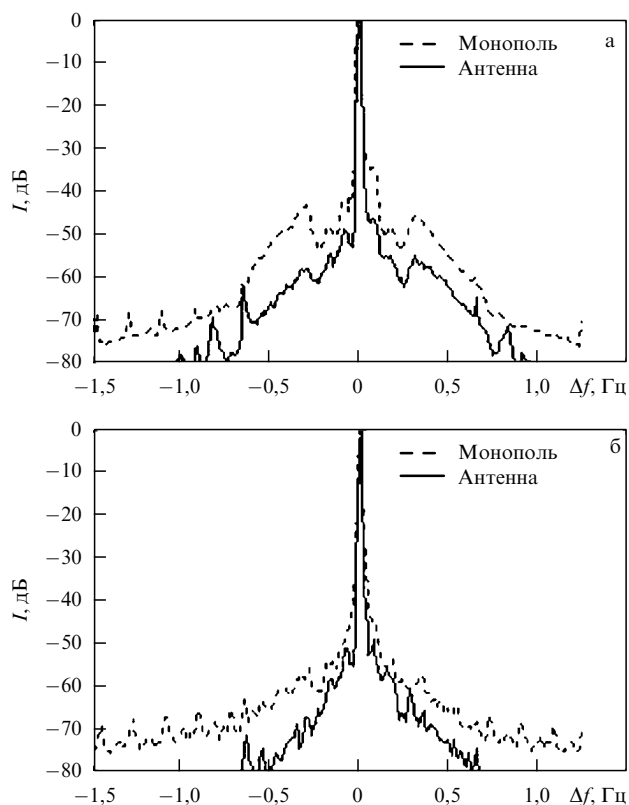


Рис. 5. Спектры интенсивности I принятого на дистанции 10 км рассеянного поверхностным волнением сигнала, возбуждаемого монополем и решёткой излучателей: (а) спектр полного сигнала на антенне, (б) спектр первой волноводной моды.

ний. Первое направление — это разработка и создание новых, более эффективных, лёгких и малогабаритных НЧГА-излучающих систем. Это направление связано с поиском новых материалов и принципов генерации НЧГА-полей. Вторым ключевым направлением, на наш взгляд, является разработка методов и алгоритмов адаптивного автоматического управления потенциалом системы наблюдения. Фактически речь идёт о физических и технологических принципах создания системы управления, обеспечивающей автоматическую генерацию имитационной системой гипотез при наблюдении с учётом гидроакустических условий.

Указанные критические технологии позволяют решать ряд фундаментальных научных задач, связанных

с изучением мелководных акваторий Мирового океана. Эти технологии могут также использоваться в смежных научных областях. Примером является когерентное сейсмоакустическое профилирование при поиске полезных ископаемых в морском дне, в котором применяются высококогерентные НЧГА-излучатели, что обеспечивает согласованное со средой когерентное пространственное и частотное накопление отражённых от морского дна сигналов и позволяет достичь уникальной эффективности при реконструкции глубоколежащих донных неоднородностей при выполнении требований экологической безопасности ГА-зондирования [13].

Работа выполнена при поддержке программой Президиума РАН "Фундаментальные проблемы океанологии: геология, физика, биология, экология", программой ОФН РАН "Фундаментальные основы акустической диагностики искусственных и природных сред", ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" (контракт 02.740.11.0565) и РФФИ (проект 09-02-00044).

Список литературы

1. Urick R J *Principles of Underwater Sound* (New York: McGraw-Hill, 1975) [Урик Р Дж *Основы гидроакустики* (Л.: Судостроение, 1978)]
2. Munk W, Worcester P, Wunsch C *Ocean Acoustic Tomography* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995)
3. Абросимов Д И и др. *ДАН СССР* **299** 477 (1988) [Abrosimov D I et al. *Sov. Phys. Dokl.* **33** 123 (1988)]
4. Кадельсон Б Г, Петников В Г *Акустика мелкого моря* (М.: Наука, 1997) [Katsnelson B G, Petnikov V G *Shallow Water Acoustics* (London: Springer, 2002)]
5. Гончаров В В и др. *Акустическая томография океана* (Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997)
6. Лучинин А Г, Хилько А И *Акуст. журн.* **51** 228 (2005) [Luchinin A G, Khil'ko A I *Acoust. Phys.* **51** 182 (2005)]
7. Хилько А И и др. *Акуст. журн.* **53** 437 (2007) [Khil'ko A I et al. *Acoust. Phys.* **53** 381 (2007)]
8. Смирнов И П, Хилько А И, Романова Т В *Изв. вузов. Радиофизика* **51** 50 (2008) [Smirnov I P, Khil'ko A I, Romanova T V *Radiophys. Quantum Electron.* **51** 45 (2008)]
9. Хилько А И и др., в сб. *Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана. Сборник трудов XXII сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета по акустике РАН Т. 2* (М.: ГЕОС, 2010) с. 244
10. Раевский М А, Хилько А И *Изв. вузов. Радиофизика* **50** 20 (2007) [Raevsky M A, Khil'ko A I *Radiophys. Quantum Electron.* **50** 18 (2007)]
11. Авербах В С и др. "Об управлении группой взаимодействующих акустических монополей", Препринт № 190 (Горький: ИПФ АН СССР, 1988)
12. Смирнов И П, Смирнова И Р, Хилько А И *Акуст. журн.* **56** 813 (2010) [Smirnov I P, Smirnova I R, Khil'ko A I *Acoust. Phys.* **56** 1067 (2010)]
13. Лазарев В А и др., в кн. *Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей* (Отв. ред. С М Шаповалов) (М.: Научный мир, 2010) с. 300

PACS numbers: **43.25.+y**, **43.30.+m**, 87.50.Y
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201111m.1228

Обзор достижений в области физической акустики в 2010 году, по материалам Научного совета РАН по акустике

И.Б. Есипов

Одной из задач Научного совета РАН по акустике является информирование научной общественности о наиболее интересных результатах, полученных в ходе исследований в лабораториях Российской академии наук, в ведущих университетах и исследовательских институтах России. В составе совета работают секции, в которых обсуждается развитие исследований по следующим направлениям:

- *акустика океана* (руководитель А.Г. Лучинин, Институт прикладной физики РАН);
- *геоакустика* (руководитель А.В. Николаев, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН);
- *аэроакустика* (руководитель В.Ф. Копьев, Центральный аэрогидродинамический институт);
- *вибраакустика* (руководитель Ю.И. Бобровницкий, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН);
- *физическая акустика твёрдого тела и акустоэлектроника* (руководитель И.Е. Кузнецова, Саратовский филиал Института радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН);
- *физический ультразвук* (руководитель О.А. Сапожников, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет).

Как следует из тематики секций, главное внимание в Научном совете уделяется исследованиям в области физической акустики и приложениям результатов в смежных областях, таких как науки о Земле и инженерные науки.

Итоги научной деятельности за 2010 г. Научный совет РАН по акустике подвёл на двух сессиях, состоявшихся в Институте общей физики РАН им. А.М. Прохорова (ИОФ РАН) и в Институте радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН в ноябре и декабре 2010 г. соответственно. На этих сессиях были выявлены наиболее значимые достижения, которые мы и предполагаем обсудить в настоящей статье.

В качестве основных совет выделяет следующие наиболее яркие достижения 2010 г.:

- новое явление взрывной неустойчивости и пространственной локализации ультразвуковых волн в ферромагнетике;
- оригинальный метод метрологии в биологических тканях нелинейных полей ультразвуковых фокусирующих излучателей;
- экспериментальная демонстрация эффективности когерентных методов сейсмоакустического зондирования морского дна.

Кроме того, представляется важным отметить разработку экспериментального образца параметрической

И.Б. Есипов. Российский университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, РФ, Акустический институт им. Н.Н. Андреева, Москва, РФ
E-mail: igor.esipov@mail.ru