

составленным описанным выше образом поправки к произведению четвертого порядка  $\Delta M_4(r, z)$ . Проведение преобразований, аналогичных приведенным для томографической схемы, использующей поле  $U(r, z)$ , приводит к системе, являющейся аналогом (3), которую в сокращенном виде можно переписать как

$$\Delta M_4(r, z_k) = \exp[i(\omega_1 - \omega_2 - \omega_3 + \omega_4)\Delta x_k/c] \sum_{j=1}^M \Delta k_j W_j(r_0, z_k), \quad (6)$$

где

$$W_j(r_0, z_k) = Q_{\omega_1} U_{\omega_2}^{0+} U_{\omega_3}^{0+} U_{\omega_4}^0 + U_{\omega_1}^0 Q_{\omega_2}^+ U_{\omega_3}^{0+} U_{\omega_4}^0 \omega_2/\omega_1 +$$

$$+ U_{\omega_1}^0 U_{\omega_2}^{0+} Q_{\omega_3}^+ U_{\omega_4}^0 \omega_3/\omega_1 + U_{\omega_1}^0 U_{\omega_2}^{0+} U_{\omega_3}^{0+} Q_{\omega_4} \omega_4/\omega_1,$$

$$\Delta k_j = \frac{\omega_1}{c^2} \Delta c_j. \text{ Здесь } Q_{\omega_i} \equiv Q_j(r_0, z_k)|_{\omega_i}, \quad U_{\omega_i}^0 \equiv U^0(r_0, z_k)|_{\omega_i}.$$

Формула (6) является конечной формулой простейшей томографической схемы. Она аналогична по своей структуре формуле (2), но является инвариантной по отношению к незначительным (порядка сотни метров) искривлениям антенны при специальном выборе частот (5), так как при этом вся информация об этих искривлениях сосредоточена в экспоненциальном множителе, который оказывается близким к единице.

Для численной проверки метода была составлена программа, производящая расчет произведения четвертого порядка описанного выше типа, с помощью которой производилось моделирование работы алгоритма. Выяснено, что произведение слабо зависит от смещения по дальности до 0,5 км, т.е. искривления антенны, приводящие к смещению ее узлов до нескольких сот метров (что можно ожидать на практике), не приводят к заметным ухудшениям результатов. Вместе с тем результат чувствителен к большому рассогласованию по дальности, что делает метод годным для целей практической томографии. Аналогичные результаты получены и для глубинной зависимости, хотя в этом случае произведение обладает большей чувствительностью. Были проведены также вычисления с целью оценить влияние изменения гидрологического профиля. Показано, что регулярные отклонения в задании профиля скорости звука, связанные, например, с опусканием оси подводного звукового канала, не приводят к сколь-либо заметным изменениям результата, в то время как случайные искажения профиля в пределах  $\pm 3$  м/с оказываются весьма чувствительными.

Таким образом, рассмотренный в статье способ томографии океана по данным, полученным с одной или нескольких вертикальных антенн большой протяженности и основанный на результатах метода нелинейной теории возмущений, позволяет сделать его работоспособным при неизвестном искривлении профиля вертикальных антенн в разумных пределах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометиздат, 1982.
2. Буров В.А., Сергеев С.Н. Решение обратной задачи рефракции методом нелинейной теории возмущений // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 3. С. 431–436.

Московский государственный  
университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в редакцию  
28.01.91

УДК 534.222.2

© 1992 г. В.А. Воронин, В.В. Котляров, В.П. Кузнецов,  
С.П. Тарасов, В.И. Тимошенко

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЕМНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С БОЛЬШОЙ БАЗОЙ

В океанологических исследованиях направленный прием низкочастотных акустических сигналов возможен с использованием бестелесных параметрических антенн с большой базой [1]. В основе явления параметрического приема звука лежит взаимодействие низкочастотных и высокочастотных волн различных пространственно-временных масштабов. Направленные свойства параметрической антенны зависят от ее относительной длины, т.е. расстояния между излучающим и приемным

преобразователями накачки в масштабах длины волны сигнала. Для направленного приема низкочастотных колебаний (менее 1000 Гц) длина параметрической антенны должна быть существенной (десятки и сотни метров). В печати имеются сообщения о теоретических оценках характеристик параметрических приемных антенн длиной сотни [2] и тысячи [3] м.

Экспериментальных исследований параметрических антенн с такими базами не производились. В существующих теориях параметрических приемных антенн [4] используется допущение, что источник принимаемого сигнала располагается на достаточном удалении от антенны, поэтому фронт низкочастотной волны сигнала при ее взаимодействии с волной накачки предполагается плоским, а интенсивность во всем объеме взаимодействия постоянной. Однако при достаточно длинных параметрических антеннах интенсивность низкочастотной волны в объеме взаимодействия меняется по длине антенны вследствие дифракции и затухания. Источник принимаемого сигнала может быть расположен как на большом расстоянии от приемной антенны, так и рядом с ней.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование характеристик чувствительности длинных приемных параметрических антенн от размера их базы. Полагаем, что излучающий преобразователь накачки малых волновых размеров на частоте сигнала и частоте накачки расположен на небольшом расстоянии от ненаправленного источника низкочастотного сигнала, следовательно, волны накачки и сигнала имеют сферический фронт распространения. Распространение сферических звуковых волн конечной амплитуды можно описать уравнением [5]

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\Phi}{r} = b \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \tau^2} + \frac{a}{2} \frac{\partial}{\partial \tau} \Phi^2; \quad (1)$$

здесь  $\Phi = \Phi(\tau, r) = \rho'/\rho_0$  – относительное возмущение плотности;  $\tau = t - r/c_0$  – время в сопровождающей системе координат;  $\rho'$  – приращение плотности;  $\rho_0, c_0$  – равновесные плотность и скорость звука в невозмущенной среде;  $r$  – расстояние в сферической системе координат;  $b$  – диссипативный коэффициент;  $a = (\gamma + 1)/2c_0$ ;  $\gamma$  – коэффициент нелинейности среды [4].

Будем искать поле  $\Phi(t, r)$  как сумму двух полей – высокочастотного и низкочастотного

$$\Phi(t, r) = \Phi_\omega(t, r) + \Phi_\Omega(t, r). \quad (2)$$

При этом предполагаем, что  $\omega \gg \Omega$  и  $\Phi_\Omega(t, r)$ , заранее заданная функция, определяющая поле сигнала и удовлетворяющая уравнению (1), т.е.

$$\frac{\partial \Phi_\Omega}{\partial r} + \frac{\Phi_\Omega}{r} = b \frac{\partial^2 \Phi_\Omega}{\partial \tau^2} + \dots \quad (3)$$

Подставляя (2) в (1), учитывая "медленность"  $\Phi_\Omega$ , фильтруя высшие гармоники и вычитая (3), получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial \Phi_\omega}{\partial r} + \frac{1}{r} \Phi_\omega = b \frac{\partial^2 \Phi_\omega}{\partial \tau^2} + a \Phi_\Omega \frac{\partial \Phi_\omega}{\partial \tau}. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) ищем в виде

$$\Phi_\omega(\tau, r) = \frac{1}{r} e^{-i[\omega\tau + \psi_\Omega(\tau, r)] - b\omega^2 r}; \quad (5)$$

здесь  $\psi_\Omega(\tau, r)$  описывает изменение фазы высокочастотной волны накачки за счет ее взаимодействия с волной сигнала. Подставляя (5) и (4), получим в линейном приближении:

$$\frac{\partial \psi_\Omega}{\partial r} = \omega a \Phi_\Omega(\tau, r). \quad (6)$$

Пусть  $\Phi_\Omega(t, r)$  есть некоторое гармоническое колебание, распространяющееся в среде с затуханием со сферическим фронтом:

$$\Phi_\Omega = \Phi_0 \Omega \frac{1}{r} e^{-i\Omega\tau - b\Omega^2 r}. \quad (7)$$

В общем случае узкополосного сигнала положим  $\Phi_\Omega = \Phi_0 \Omega \frac{1}{r} f(\tau) e^{-b\Omega^2 r}$ , где  $f(\tau)$  – некоторая временная функция.

Решение уравнения (6) с условием (7) для фазы высокочастотного колебания имеет вид

$$\psi_\Omega = \omega a \Phi_0 \Omega f(\tau) \int_{R_1}^{R_2} \frac{e^{-b\Omega^2 r}}{r} dr; \quad (8)$$

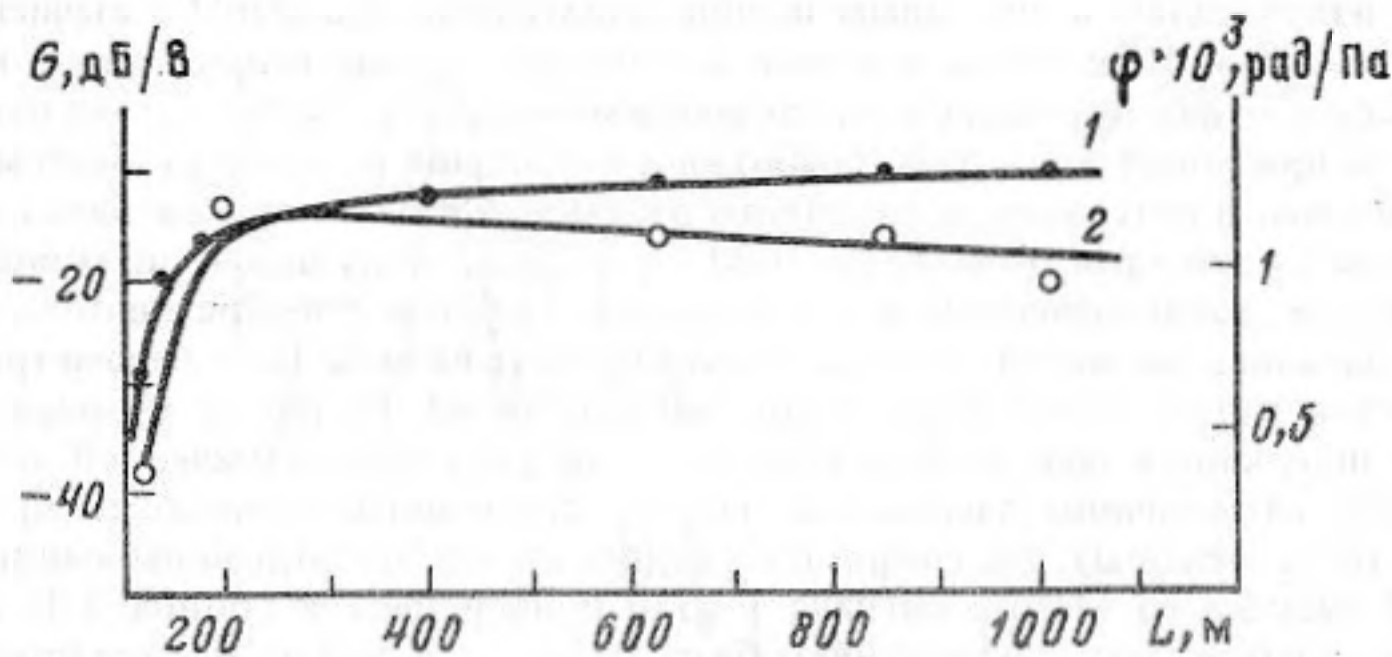


Рис. 1

Рис. 1. Расчетная зависимость чувствительности антенны (1) и зависимость амплитуды спектральной составляющей частоты 1 кГц на выходе приемника (2 – результат усреднения по 64 реализациям) от длины базы антенны  $L=R_2-R_1$  при  $f_H = 20$  кГц.

Рис. 2. Структурная схема проведения экспериментальных исследований параметрической приемной антенны в натуральных условиях (1 – излучатель сигнала, 2 – излучатель накачки, 3 – приемник накачки, 4 – погружаемый блок, 5 – кабель-трос, 6 – излучающий блок, 7 – приемный блок)

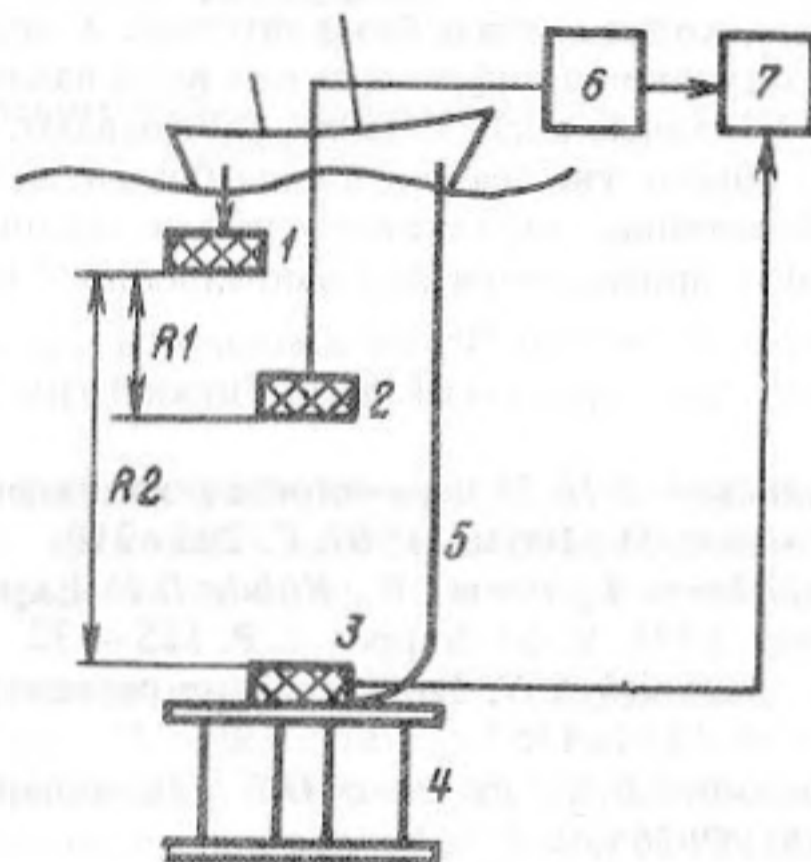


Рис. 2

здесь  $R_1$  и  $R_2$  – расстояния от источника сигнала до излучающего и приемного преобразователей накачки, т.е.  $R_2 - R_1 = L$  – длина параметрической антенны. Интеграл в правой части представляет собой разность интегрально-показательных функций:

$$\psi_{\Omega} = \omega a \Phi_0 \Omega f(\tau) \{ E_i[-R_2 b \Omega^2] - E_i[-R_1 b \Omega^2] \}.$$

Переходя к звуковому давлению, получим

$$\psi_{\Omega} = \frac{\omega(\gamma + 1)}{2\rho_0 c_0^3} P'_0 \Omega f(\tau) \int_{R_1}^{R_2} \frac{e^{-b\Omega^2 r}}{r} dr;$$

здесь  $P'_0 \Omega$  – амплитуда звукового давления сигнала, приведенная к расстоянию в 1 м от излучающего преобразователя накачки, т.е.  $R_1 = 1$  м.

Анализ выражения (8) показывает, что в нашем случае индекс фазовой модуляции высокочастотного колебания пропорционален частоте накачки и амплитуде низкочастотного колебания, а также имеет сложную зависимость от длины антенны. На рис. 1 (кривая 1) представлены зависимости индекса фазовой модуляции от длины антенны  $L = R_2 - R_1$ , причем  $R_2 > R_1$ . В расчетах предполагалось, что частота накачки  $f_H = 20$  кГц, расстояние  $R_2 - R_1$  меняется от 0 до 1000 м. Индекс фазовой модуляции и, следовательно, чувствительность растет с увеличением длины антенны и уменьшается с увеличением коэффициента затухания. Сферическое расхождение фронтов взаимодействующих волн приводит к тому, что с ростом длины антенны происходит как бы насыщение (при больших длинах антенны индекс фазовой модуляции растет значительно медленнее, чем при малых).

В Таганрогском радиотехническом институте разработан комплект приборов параметрической акустической приемной антенны с длиной базы  $L$  до 1000 м и более. Экспериментальные исследования проведены в условиях океана в рейсе научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш". На рис. 2 приведена схема испытаний. Излучающий преобразователь накачки заглублялся на 10 м от поверхности и ориентировался в сторону дна. Приемный преобразователь закреплялся на погружаемом блоке акустического зонда и ориентировался в сторону излучающего преобразователя. Погружаемый блок с помощью кабель-троса опускался на необходимую глубину. Отсчет

расстояния между излучающим и приемным преобразователями (размер  $L$ ) вычислялся по задержке зондирующего сигнала. Излучатель накачки возбуждал в воде непрерывную волну накачки с частотой 20 кГц, которая формировалась в излучающем блоке. Принятый сигнал накачки по кабель-тросу подавался на приемный блок для обработки и выделения индекса фазовой модуляции сигнала накачки, полученного в результате нелинейного взаимодействия волны сигнала с волной накачки. Импульсные сигналы с частотами от 1000 до 3000 Гц, а также импульсный шумовой сигнал, излучались преобразователем, располагающимся у поверхности вблизи преобразователя накачки. Принятые сигналы записывались на магнитофон, а затем обрабатывались. База параметрической антенны изменялась дискретно путем заглубления погружаемого блока. На рис. 1 (кривая 2) представлена экспериментально полученная зависимость выходного сигнала параметрической антенны (с выхода фазового детектора) от величины расстояния между излучающим и приемным преобразователями накачки  $R_2 - R_1$  (база антенны). На графике по вертикальной оси отложены амплитуды спектральной составляющей сигнала на частоте сигнала 1 кГц, приведенная к уровню 1 В. Экспериментальная зависимость показывает, что с изменением базы антенны сигнал на выходе приемника меняется в соответствии с приведенной на рис. 1 зависимостью чувствительности от величины  $L$ . Зависимость имеет накапливающийся характер. Физически это означает, что максимальное взаимодействие сигналов происходит вначале базы антенны, а затем добавка за счет взаимодействия уменьшается вследствие затухания и дифракции как волн накачки, так и волн сигнала.

Проведенные исследования показывают, что параметрические антенны с большой базой реализуемы (однако увеличение длины базы с целью повышения чувствительности приемной параметрической антенны эффективно лишь в ограниченных масштабах). Параметрические приемные антенны могут применяться для направленного приема низкочастотных акустических сигналов в океане.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.П. О параметрических явлениях в акустике океана. — В кн.: Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987, С. 205–210.
2. Goldsberry T., Reeves R., Rohde D.F. Experimental with a large aperture Pararay // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 64. Suppdy 1. P. 125–132.
3. Mc. Donough R.N. Long aperture parametric receiving arrays // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1975. V. 57. N 5. P. 1150–1155.
4. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. С. 264.
5. Кузнецов В.П. Уравнения нелинейной акустики // Акуст. журн. 1970. Т. 16, № 4, С. 548–553.

Таганрогский радиотехнический институт  
им. В.Д. Калмыкова

Поступило в редакцию  
04.07.91

УДК 534.44

© 1992 г. В.А. Захаров, В.А. Лазарев, А.А. Салтыков,  
А.Д. Соколов, Л.И. Татаринев, Г.А. Шаронов

#### ВАРИАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕЛЯЦИИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НЕОДНОРОДНОМ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВОЛНОВОДЕ

Исследования пространственно-временной изменчивости океанической среды при помощи акустического зондирования на стационарных трассах ранее проводились как в глубоком океане [1,2], так и в мелком море [3–5] в относительно однородных вдоль трассы распространения звука волноводах. Данная работа представляет результаты измерения временной зависимости функции пространственной корреляции акустического поля в проливной зоне со значительной временной и пространственной изменчивостью гидрофизических условий. Аналогичные условия проведения эксперимента имели место в работе [6], где рассмотрена однолучевая модель распространения звука. Свойства же среды в проливной зоне моделируют условия распространения в океанических волноводах большой протяженности с переменными в пространстве и во времени акустическими характеристиками.

Пространственно-временная изменчивость условий акустического распространения контролировалась по структуре вертикальных профилей скорости звука вдоль трассы и их временным флуктуациям, в частности, флуктуациям глубины с постоянными значениями скорости звука, которые регистрировались в области установки излучателя. Существенная неоднородность волновода создавалась переменной по трассе глубиной района, а наличие течений приводило к временной неста-