

2. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростиздат. 2007. – 448 с.
3. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1982.

**Воронин Артем Васильевич**

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

E-mail: [egamt@fep.tsure.ru](mailto:egamt@fep.tsure.ru)

347928, Россия, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44

Тел.: 8(8634)37-17-95

**Тарасов Сергей Павлович**

E-mail: [egamt@fep.tsure.ru](mailto:egamt@fep.tsure.ru)

**Кузнецов Владислав Петрович**

Институт океанологии Академии наук Российской Федерации им. П.П. Ширшова

E-mail: [ocean@mail.ru](mailto:ocean@mail.ru)

117997, г. Москва, Россия, Нахимовский проспект, 36, тел.: 8(499)1245996

**Voronin Artem Vasilievich**

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: [egamt@fep.tsure.ru](mailto:egamt@fep.tsure.ru)

44, Nekrasovskiy, GSP-17a, Taganrog, 347928, Russia, Ph.: +7(8634)37-17-95

**Tarasov Sergeyi Pavlovich**

E-mail: [egamt@fep.tsure.ru](mailto:egamt@fep.tsure.ru)

**Kuznecov Vladislav Petrovich**

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, PAS

E-mail: [ocean@mail.ru](mailto:ocean@mail.ru)

36, Nahimovskiy, Moscow, 117997, Russia, Ph.: +7(449)1245996

УДК 534.222.2

**А.В. Воронин, В.П. Кузнецов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНЫХ  
ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН С УПРАВЛЯЕМОЙ  
В ПРОСТРАНСТВЕ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ**

*В работе приводятся характеристики приемной параметрической антенны, работающей в волноводе. Показано, что изменение фазовой скорости волны накачки изменяет положение главного максимума характеристики направленности, а изменение затухания волн накачки приводит к изменению бокового поля приемной параметрической антенны.*

*Приемная параметрическая антенна; характеристика направленности; антенна бегущей волны; боковое поле; взаимодействие акустических волн.*

**INVESTIGATION OF THE FEATURES OF THE RECEIVING  
PARAMETRIC ARRAY WITH OPERATED IN SPACE BEAM PATTERN**

*In paper the features receiving parametric array, working in tube, are presented. It is shown that change to phase velocity of the pumping waves changes the position a main maximum of the beam pattern, but change the saturation the pumping waves brings the lateral field receiving parametric arrays about change.*

*The reception parametric array; beam pattern; running wave array; lateral field; interaction of the acoustic waves.*

Для экологического мониторинга водных масс, донных структур, подводных инженерных сооружений в последнее время широко используются акустические методы, так как они наиболее информативны и достаточно просто реализуются.

Построение акустических систем экологического мониторинга связано с проектированием акустических антенных систем. При этом встает вопрос оптимизации системы мониторинга и выбора размеров антенной системы, ее характеристик и частотного диапазона. Для хорошего проникновения колебаний в грунт необходимо выбирать низкие частоты для уменьшения затухания колебаний в грунте. А для высокого разрешения придонных слоев необходима узкая характеристика направленности. Эту проблему можно решить двумя способами – 1) применить высоконаправленную излучающую на низких частотах антенну, или высоконаправленную приемную антенну, при этом размеры антенной системы достаточно велики на низких частотах. Кроме того, высокий уровень боковых лепестков в таких антеннах может дать неоднозначность в определении профилей придонных осадков, так как времена прихода отраженных сигналов от слоев в основном лепестке будут сравнимы с временами прихода сигналов от поверхности дна в основном лепестке. Этого можно избежать, используя в излучающем тракте излучающую параметрическую антенну, имеющую малые габариты и практическое отсутствие боковых лепестков в характеристике направленности. Такие системы разработаны в Технологическом институте Южного федерального университета в г. Таганроге на кафедре электрогидроакустической и медицинской техники [1]. Они успешно используются для вышеперечисленных работ. Однако параметрические излучающие антенны не обратимы и их невозможно использовать для приема отраженных сигналов и поэтому нужно разрабатывать специальные приемные антенны. Кроме того, малая эффективность параметрических излучающих антенн позволяет профилировать только первые сотни метров в глубину придонных осадков. Для увеличения глубины профилирования необходимо использовать традиционные антенны, а при малых их габаритах узкую характеристику направленности получить не удастся. И 2) можно использовать традиционную антенну с широкой характеристикой направленности и узконаправленную приемную антенну с пониженным уровнем боковых лепестков.

Приемная параметрическая антенна описана в [1,2], где приведены ее характеристики в безграничной среде. Если использовать для волн накачки направляющие системы, то характеристики приемной параметрической системы можно изменять путем изменения частоты волны накачки и ее фазовой скорости.

Простейшая схема приемной параметрической антенны содержит излучающий и приемный преобразователи, расположенные на расстоянии  $L$  друг от друга. Схематически приемная параметрическая антенна изображена на рис. 1. Диаграм-

ма направленности такой антенны зависит от отношения расстояния  $L$  к длине волны сигнала  $\Lambda$ , а также пространственной ориентации полей сигнала и накачки, причем для направленного приема необходимо, как минимум, иметь  $L/\Lambda \gg 1$ .

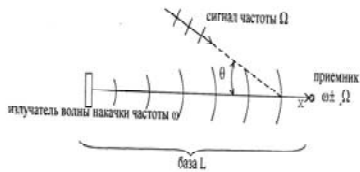


Рис. 1. Схема параметрической приемной антенны

Рассмотрим вкратце математическую модель характеристик параметрической приемной антенны. Если сигналом является низкочастотная плоская звуковая волна, распространяющаяся под углом  $\theta$  к оси  $x$ , то изменение скорости распространения вследствие нелинейности среды можно определить как:

$$c_0 \mu(t, x, y) \equiv \delta_{\Omega}(t, x, y) = \frac{\gamma - 1}{2c_0 \rho_0} P_{\Omega}(t, x, y), \quad P_{\Omega}(t, x, y) = P_{0\Omega} \sin \left[ \Omega \left( t - \frac{x}{c_0} \cos \theta - \frac{y}{c_0} \sin \theta \right) \right], \quad (2)$$

где  $P_{0\Omega}$  – амплитуда звукового давления низкочастотной волны сигнала, и вычисляя приращение скорости звука [1,2], и проекцию скорости частиц в низкочастотной волне

$$U_{x\Omega}(t, x, y) = \frac{\cos \theta}{c_0 \rho_0} P_{\Omega}(t, x, y),$$

а также функцию вторичных источников

$$Q(t, x, y) = \frac{\varepsilon - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}{\rho_0 c_0^2} P_{\Omega}(t, x, y),$$

где  $\varepsilon = \frac{(\gamma + 1)}{2}$  – нелинейный параметр, и, подставляя  $Q(t, x, y)$  в (1), вычислим «медленную» фазу высокочастотной волны на пути  $L$  от излучателя до приемника:

$$\Psi(t, L) = \Psi_0 \sin \left( \Omega t - \frac{2\pi L}{\Lambda \cos \theta} + \delta \right),$$

где  $\Psi_0 = \frac{P_{0\Omega} k L}{2 \rho_0 c_0^2} \left( \varepsilon - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \frac{\sin \delta}{\delta}$ ,  $\delta = \frac{2\pi L}{\Lambda} \sin^2 \frac{\theta}{2}$  – фазовая расстройка, обуслов-

ленная различием скоростей высокочастотной волны и «следа» волны сигнала. Формулы получены при условии, что длина волны сигнала много больше поперечных размеров высокочастотного пучка  $\Lambda \gg d$ .

Приведенное выражение показывает, что характеристика направленности приемной параметрической антенны при распространении волн накачки в свободном пространстве в среде без дисперсии представляет собой характеристику направленности антенны бегущей волны. При этом максимум характеристики направленности получается при  $\theta = 0$ . Это физически объяснимо тем, что максимум взаимодействия волн получается при коллинеарном распространении волн и с равными скоростями.

Предположим, что волны накачки распространяются в круглом звукопрозрачном для волн сигнала волноводе. Тогда фазовая скорость волн накачки может изменяться при изменении частоты волны накачки вследствие геометрической дисперсии. На апертуре антенны поле будет аналогично полю бегущей волны и будет создано фазовое распределение источников, возникающих в результате не-

линейного взаимодействия, по длине антенны, меняющееся при изменении частоты волны накачки.

Пусть поле на апертуре антенны описывается формулой

$$a(x, t) = Ae^{i(\omega t - \alpha(x))},$$

где  $\omega$  – угловая частота, амплитуда  $A$  постоянна, а фаза распределена по линейному закону  $\alpha(x) = \beta x$ , где  $\beta = \frac{\omega}{v_\phi}$ ,  $v_\phi$  – фазовая скорость волны, тогда  $a(x, t)$  совпадает с полем плоской волны (с волновым числом  $k = \frac{\omega}{c_0}$ ,  $c_0$  – скорость звука в среде без дисперсии), падающей на апертуру под углом  $\theta$  к оси  $x$ , при этом  $\cos \theta = \frac{\beta}{k} = \frac{c_0}{v_\phi}$ . Синфазную антенну можно рассматривать как частный вариант антенны бегущей волны с  $\beta = 0$ ,  $\theta = \pi/2$ . В общем случае линейное распределение фазы на апертуре сочетается с различными изменениями амплитуды из-за затухания волн накачки и, следовательно, уменьшения результата нелинейного взаимодействия.

Фазовая скорость волн накачки в круглом волноводе больше скорости звука в бездисперсионной среде и прием максимален с направления, соответствующего углу  $\theta$  к оси  $x$  ( $\pi/2 > \theta > 0$ ) и совпадающего с направлением распространения эффективной плоской волны.

Получить характеристику направленности такой антенны возможно интегрированием поля, создаваемого источниками с таким фазовым распределением. В результате получим

$$\Psi_0 = \frac{P_0 \Omega k L}{2 \rho_0 c_0^2} \left( \varepsilon - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \cdot \int_0^L e^{i\alpha(x)} \cdot e^{ikx(1-\cos \theta)} dx. \quad (2)$$

Поскольку фазовая скорость в круглом волноводе может изменяться от скорости звука в бездисперсионной среде до бесконечности, проанализируем изменения характеристики направленности приемной параметрической антенны при изменении фазовой скорости волны накачки. При этом, учитывая, что направленность в основном определяется интегралом в выражении (2), будем определять характеристику направленности в виде

$$R(\theta) = \int_0^L e^{i\alpha(x)} \cdot e^{ikx(1-\cos \theta)} dx. \quad (3)$$

На рис. 2 приведены характеристики направленности в плоскости, проходящей через ось антенны и перпендикулярной поверхности антенны накачки.

На рисунке показаны характеристики направленности для  $L/\lambda = 10$ ,  $c_0 = 1500$  м/с,  $v_\phi = 1500$  м/с (кривая 1), 2000 м/с (кривая 2), 5000 м/с (кривая 3), 10000 м/с (кривая 4). Анализ характеристик показывает, что при увеличении фазовой скорости волны накачки характеристика направленности поворачивается и становится «воронкообразной». При  $v_\phi \rightarrow c_0$  конус прижимается к оси, а при  $v_\phi = c_0$  чувствительность максимальна в направлении оси. Необходимо отметить, что при фазовой скорости равной бесконечности характеристика направленности такой антенны

аналогична направленности антенны в виде отрезка прямой с равномерным амплитудным распределением.

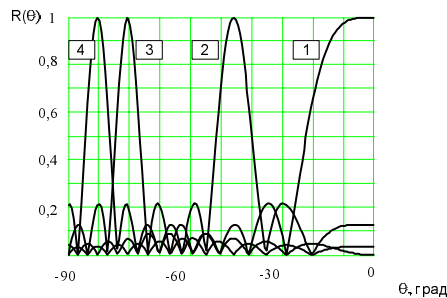


Рис. 2. Характеристики направленности приемной параметрической антенны с направляющей системой

волны с частотой, намного большей частоты волны принимаемого сигнала, то распределение амплитуды источников по длине приемной антенны будет в основном зависеть от затухания волн накачки. Изменяя частоту волны накачки, можно управлять затуханием и, следовательно, амплитудным распределением источников по апертуре антенны.

Вводя в выражение (3) амплитудное распределение источников, получим следующее выражение для характеристики направленности приемной параметрической антенны с учетом затухания:

$$R(\theta) = \frac{\int_0^L e^{-\eta x} e^{i\alpha(x)} \cdot e^{ikx(1-\cos\theta)} dx}{\int_0^L e^{-\eta x} dx}. \quad (4)$$

В выражении (4) сомножитель  $e^{-\eta x}$  отражает изменение амплитудного распределения по длине антенны за счет затухания волн накачки с коэффициентом затухания  $\eta$ .

Проанализируем влияние затухания волн накачки на характеристику направленности, используя выражение (4). Сначала положим, что фазовая скорость совпадает со скоростью звука в свободном пространстве. На рис. 3 приведены диаграммы направленности параметрического приемника для разных значений коэффициента затухания, причем в некоторых случаях коэффициент затухания взят заведомо большим для наглядности его влияния.

Характеристики направленности рассчитывались для следующих параметров антенны: на рисунке показаны характеристики направленности для  $L/\Lambda=10$ ,  $c_0=1500$  м/с,  $v_\phi=1500$  м/с. Кривая 1 соответствует коэффициенту затухания, равному 0, 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 2.

Анализ диаграмм показывает, что введение амплитудного распределения по длине антенны за счет затухания волн накачки приводит к расширению характеристики направленности, «заплыванию» нулей в характеристике направленности и

Параметрическая акустическая приемная антенна является в общем случае антенной бегущей волны и линейное распределение фазы по длине антенны может вполне сочетаться с различными изменениями амплитуды по апертуре. В параметрической приемной антенне распределение источников по апертуре определяется нелинейным взаимодействием волны сигнала с волной накачки. Как показано ранее [2], это распределение пропорционально произведению амплитуд давления волн накачки и сигнала. Поскольку в качестве волн накачки обычно используются

повышению уровня бокового поля. Причем, чем больше затухание, тем более выражены эти изменения.

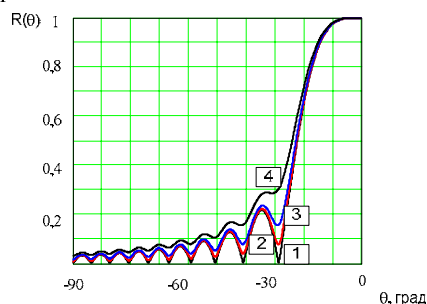


Рис. 3. Диаграммы направленности параметрической приемной антенны без сканирования характеристики направленности

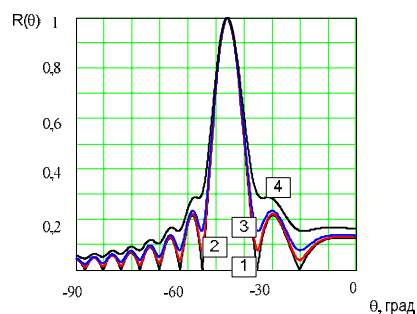


Рис. 4. Диаграммы направленности при сканировании характеристики направленности за счет изменения фазовой скорости волны накачки

На рис. 4 приведены диаграммы направленности параметрической приемной антенны при повороте характеристики направленности за счет изменения фазовой скорости волны накачки. Расчеты проводились при тех же параметрах антенны, но при  $v_{\phi} = 2000$  м/с.

Анализ результатов расчетов показывает, что и при повороте характеристики направленности закономерности влияния затухания волн накачки сохраняются. Необходимо отметить, что в повернутой характеристике направленности наблюдается несимметричность характеристики относительно оси антенны, проходящей через максимум характеристики направленности. Это косвенным образом подтверждает правильность проведенных исследований, поскольку в теории антенных систем [3] такое явление существует.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. – 448 с.
2. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.
3. Смартышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. – Л.: Судостроение, 1984.

#### Воронин Артем Васильевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

Е-mail: [egamt@fep.tsure.ru](mailto:egamt@fep.tsure.ru)

347928, Россия, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44

Тел.: 8(8634)37-17-95

**Кузнецов Владислав Петрович**

Институт океанологии Академии наук Российской Федерации им. П.П. Ширшова

E-mail: [okean@mail.ru](mailto:okean@mail.ru)

117997, г. Москва, Россия, Нахимовский проспект, 36, тел.: 8(499) 1245996

Научный сотрудник института океанологии АН технических наук, доктор технических наук

**Voronin Artem Vasilievich**

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: [egamt@fep.tsure.ru](mailto:egamt@fep.tsure.ru)

44, Nekrasovskiy, GSP-17a, Taganrog, 347928, Russia, Ph.: +7(8634)37-17-95

**Kuznecov Vladislav Petrovich**

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, PAS

E-mail: [okean@mail.ru](mailto:okean@mail.ru)

36, Nahimovsky, Moscow, 117997, Russia, Ph.:+7(449)1245996

УДК У681.586

**С.С. Снесарев, Г.В. Солдатов, А.И. Барсуков**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

*Данная работа посвящена проблеме контроля характеристик гидроакустических преобразователей и антенн, являющихся неотъемлемой частью систем экологического мониторинга водоемов. Рассмотрены методы измерения частотной характеристики преобразователей. Разработан алгоритм работы и программное обеспечение для автоматизированной установки.*

*Диагностика оборудования; структурная схема; частотная характеристика; программное обеспечение.*

**S. S. Snesarev, G. V. Soldatov, A.I. Barsukov**

**AUTOMATED PLANT FOR MEASUREMENT FEATURES OF  
TRANSDUCERS FOR ENVIRONMENTAL CONTROLLING SYSTEM**

*The article concerned with the problem of characteristics measurements and controlling of transducers and antennas for hydroacoustics equipment. Such equipment is necessary for environmental monitoring of water body. Design and algorithm of working automated plant for this purposes were described.*

*Diagnostics of the equipment; the block diagram; frequency characteristic; software.*

Современное развитие промышленности, транспорта, прокладка новых газонефтепроводов в значительной мере повышают уровень загрязнения окружающей среды и в первую очередь рек, водоемов и морей. Природоохранительная стратегия, направленная на контроль водной среды, практически невозможна без регулярного и массового контроля санитарно-гигиенических нормативов, обеспечения