

4. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
5. *Буланов В.А.* Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 280 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.Н. Чернов.

**Воронин Артем Васильевич**

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

E-mail: ega@tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; ассистент.

**Воронин Василий Алексеевич**

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Voronin Artem Vasilievich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ega@tti.sfedu.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia

Phone: +78634371795.

The Department of Electrohydroacoustical & Medical Engineering; Assistant.

**Voronin Vasily Alekseevich**

The Department of Electrohydroacoustical and Medical Engineering; Dr. of Eng. Sc., Professor.

УДК 534.222.2

**А.В. Воронин, С.П. Тарасов**

**СКАНИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИЕМНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В СИСТЕМАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

*Приводятся характеристики приемной параметрической антенны, работающей в волноводе с дисперсией скорости звука. Показано, что изменение частоты волны накачки изменяет форму характеристики направленности, что может служить информативным признаком в экологическом мониторинге водных акваторий. Приемная параметрическая антенна представляет собой антенну бегущей волны, в которой изменение фазовой скорости волны накачки вследствие дисперсии в такой антенне приведет к изменению характеристики направленности такой антенны так же, как и в диэлектрических антеннах радиоволнового диапазона. В работе приведены структурные схемы реализации приемных параметрических антенн с различными характеристиками.*

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

**A.V. Voronin, S.P. Tarasov**

**SCANNING THE BEAM PATTERN RECEIVING PARAMETRIC ARRAYS IN SYSTEM ECOLOGICAL MONITORING**

*Features receiving parametric array happen to in work, working in wave-guide with dispersion of sound speed. It is shown that change the frequency of the pumping waves changes form beam pattern that can serve by sign in ecological monitoring water area. The Reception parametric*

*tric antenna presents itself array of the running wave, in which change to phase velocity of the wave of the pumping in consequence of dispersion in such antenna will bring about change the feature to directivities such antenna in the same way, either as in array of radio range. In this paper are brought structured schemes to realization of the receiving parametric array with different feature.*

*Reception parametric array; beam pattern; running wave array; interaction of the acoustic waves.*

В последнее время большое внимание уделяется экологическому состоянию водоемов и поэтому интенсивно развиваются средства их экологического мониторинга. Для экологического мониторинга водных масс, донных структур, подводных инженерных сооружений широко используются акустические методы, так как они наиболее информативны и достаточно просто реализуются.

В задачи экологического мониторинга входит наблюдение за загрязнением водоема промышленными отходами, развитием микроорганизмов и водорослей, количеством и составом рыбных запасов. Таким образом, мониторинг водной среды ставит задачу оценки загрязненности слоев моря, в которых концентрируются фазовые включения различного происхождения, нефтяные продукты, твердые взвеси, пузырьки газа и другие неоднородности морской среды, которые приводят к рассеянию звука, дополнительному затуханию, дисперсии скорости звука, появлению дополнительной нелинейности, а также к изменению целого ряда других акустических характеристик, важных для проведения исследований и измерений. С точки зрения мониторинга водной среды интерес представляет разработка методов решения задач с применением акустических методов, которые зачастую являются единственными дистанционными методами исследований свойств и структуры неоднородных сред. В последнее время в морских исследованиях широко используются параметрические антенны (ПА) [1].

В настоящее время модель излучающей параметрической антенны достаточно хорошо изучена [1, 2]. Известно, что основным результатом нелинейного взаимодействия излучаемых акустических волн является генерация суммарной и разностной волн, а также гармоник волн накачки. Важной особенностью ПА является то, что можно влиять на ее характеристики, изменяя параметры волны накачки. Таким образом, 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; 2) использовать традиционную антенну с широкой характеристикой направленности и узконаправленную приемную антенну с пониженным уровнем боковых лепестков. 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 парамет-

рические 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. Для направленного приема низкочастотных сигналов в настоящее время используются гибкие протяженные антенны, состоящие из пьезокерамических преобразователей, помещенных в гибкий шланг, заполненный жидким парафином. Такая система формирует дискретную протяженную антенну. Однако такая антенна достаточно громоздкая и дорогая из-за присутствия в ней преобразователей, которые необходимо располагать через половину длины волны самой высокочастотной компоненты принимаемых сигналов для возможности сканирования характеристики направленности в пространстве. Для геолокации можно использовать приемную параметрическую антенну локационного типа [1]. В такой антенне происходит взаимодействие отраженных от границы вода-дно волн накачки с отраженной от поверхности раздела волной сигнала. Волны накачки имеют сферический расходящийся фазовый фронт и результат взаимодействия довольно мал.

Решение поставленной задачи может быть осуществлено применением приемной параметрической антенны, заключенной в гибкий шланг, при этом заполнение шланга может быть осуществлено забортной водой. В такой системе организуется приемная антенна бегущей волны, характеристики которой еще недостаточно изучены. В гибкой протяженной антенне, являющейся волноводом, скорость распространения волны изменяется вследствие дисперсии волн в волноводах. При этом в зависимости от соотношения длины волны и размеров волновода распространяются различные моды колебаний, которые имеют свои фазовые скорости. Поскольку приемная параметрическая антенна представляет собой антенну бегущей волны, то изменение фазовой скорости волны накачки вследствие дисперсии в такой антенне приведет к изменению характеристики направленности такой антенны так же, как и в диэлектрических антеннах радиоволнового диапазона.

Предположим, что волны накачки распространяются в круглом звукопрозрачном для волн сигнала волноводе. Фазовая скорость волн накачки будет 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 нелинейного взаимодействия, по длине антенны, меняющееся при изменении частоты волны накачки.

Зависимость фазовой скорости звука от частоты для круглого волновода с акустически жесткими стенками находится по формуле [3]:

$$c(f) = c_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{кр}}{2 \cdot \pi \cdot f} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $f_{кр}$  – критическая частота нормальной волны ( $f_{кр} = \frac{\alpha_{01} \cdot c_0}{d}$ );  $d$  – диаметр волновода;  $c_0$  – скорость звука в среде;  $\alpha_{01}$  – корень решения уравнения распространения волн в круглом волноводе  $\alpha_{01} = 1,21$ .

На рис. 1 показана такая зависимость, которая показывает, что волны накачки параметрического приемника можно выбирать в различных диапазонах в пределах между критическими частотами.

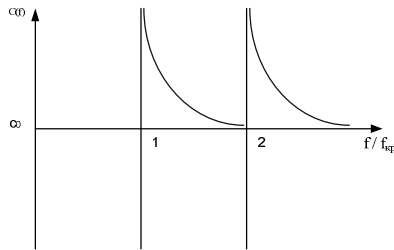


Рис. 1. Зависимость фазовой скорости в круглом волноводе от частоты

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:

$$c_0 \mu(t, x, y) \equiv \delta c_{\Omega}(t, x, y) = \frac{\gamma - 1}{2c_0 \rho_0} P_{\Omega}(t, x, y)$$

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

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), получим «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, обусловленная 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 волн 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, то  $a(x, t)$  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

$$\Psi_0 = \frac{P_{0\Omega} k L}{2 \rho_0 c_0^2} \left( \varepsilon - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \cdot \int_0^L e^{i\alpha(x)} \cdot e^{ikx(1-\cos\theta)} dx. \quad (3)$$

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 (3), будем определять характеристику направленности в виде

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

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

На рисунке показаны характеристики направленности для  $L/A=10$ ,  $c_0=1\ 500$  м/с,  $v_\phi=1\ 500$  м/с (кривая 1), 2 000 м/с (кривая 2), 5 000 м/с (кривая 3), 1 0000 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.

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 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.

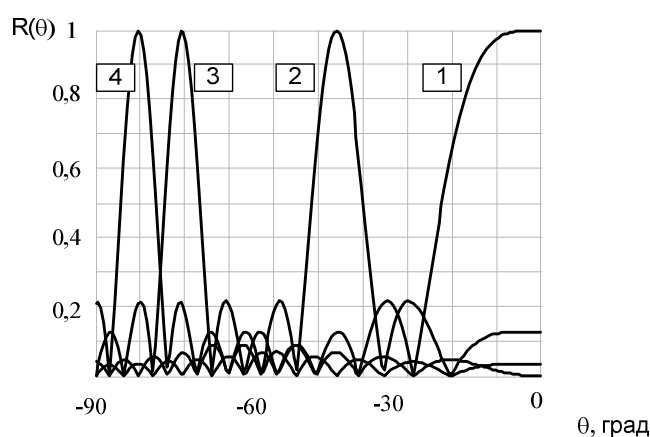


Рис. 2. Характеристики направленности приемной параметрической антенны с направляющей системой

Схема, реализующая параметрическую приемную антенну со сканированием характеристики направленности путем изменения частоты накачки в круглом волноводе, приведена на рис. 3, а с веером статических характеристик направленности — на рис. 4.

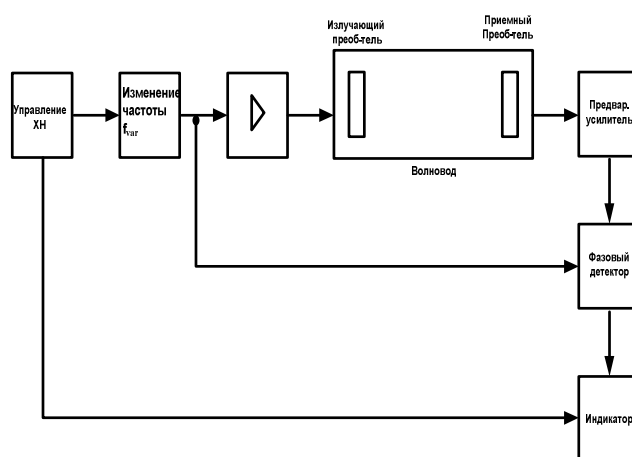


Рис. 3. Схема приемной параметрической антенны со сканированием характеристики направленности

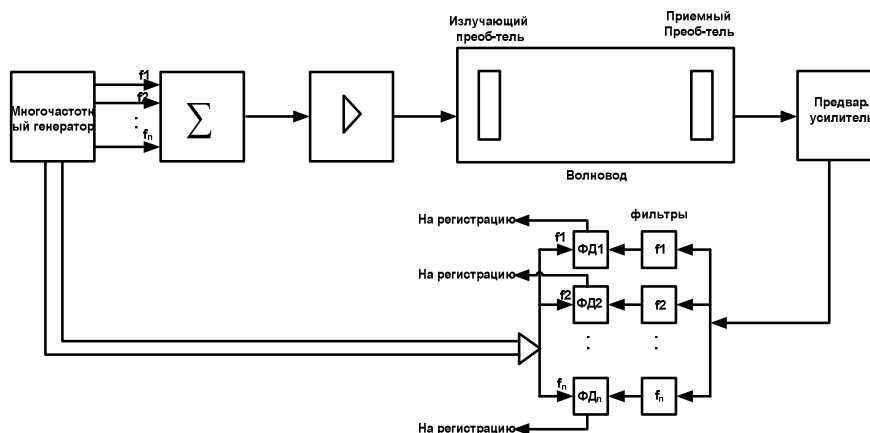


Рис. 4. Схема приемной параметрической антенны с веером статических лучей характеристики направленности

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2004. – 400 с.
2. 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.
3. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.Н. Чернов.

#### **Воронин Артем Васильевич**

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

E-mail: ega@tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; ассистент.

#### **Voronin Artem Vasilievich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ega@tti.sfedu.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia

Phone: +78634371795.

The Department of Electrohydroacoustical and Medical Engineering; Assistant.

#### **Тарасов Сергей Павлович**

E-mail: ega@tti.sfedu.ru.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; заведующий кафедрой; д.т.н.; профессор.

#### **Tarasov Sergeyi Pavlovich**

E-mail: ega@tti.sfedu.ru.

The Department of Electrohydroacoustical and Medical Engineering; Chief Department; Dr. of Eng. Sc., Professor.