

18. Red'kin P.P. 32/16-bitnye mikrokontrollery ARM7 semeystva AT91SAM7 firmy Atmel [32/16-bit microcontroller family ARM7 AT91SAM7 Atmel]. Moscow, 2008, 704 p.
19. Steshenko V. PLIS firmy ALTERA: elementnaya baza, sistema proektirovaniya i yazyki opisaniya apparatury [FPGA ALTERA: element base, system design languages and hardware description]. Moscow: DMK Press, 2015, 576 p.
20. Kaevitser V.I., Krivtsov A.P., Razmanov V.M., Smol'yaninov I.V., Elbakidze A.V., Denisov E.Yu. Distantionno upravlyaemyy kater s gidrolokatorom bokovogo obzora dlya kartografirovaniya dna mal'kh vodoemov [A remote-controlled boat with side-scan sonar for mapping the bottom of small ponds], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 10 (183), pp. 80-91.
21. Logvina E.A., Matveeva T.V., Gladyshev V.A., Krylov A.A. Kompleksnyye issledovaniya pokmarkov na chukotskom plato [A comprehensive study of pockmarks on the Chukchi plateau], *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Problems of Arctic and Antarctic], 2011, No. 2 (88), pp. 45-54.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

Каевитсер Владилен Иосифович – ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН; e-mail: kvi43@mail.ru; 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. акад. Б.А. Введенского, 1; тел.: 84965652616; г.н.с.; д.т.н.

Кривцов Александр Павлович – e-mail: mybox17@yandex.ru; тел.: 84965652451; с.н.с.; к.ф.-м.н.

Смолянинов Илья Вячеславович – e-mail: ilia159@mail.ru; тел.: 84965652451; научный сотрудник.

Элбакидзе Андрей Владимирович – e-mail: elbakidze@mail.ru; тел.: 84965652447; с.н.с.

Kaevitser Vladilen Iosifovich – Kotel'nikov institute of Radio Engineering and Electronics of RAS; e-mail: kvi43@mail.ru; 141190, Moscow region; Fryazino, square akad. B.A. Vvedenskogo, 1; phone: +74965652616; chief researcher; dr. of eng. sc.

Krivtsov Alexandr Pavlovich – e-mail: mybox17@yandex.ru; phone: +74965652451; senior scientist; cand. of phis.-math. sc.

Smolyaninov Ilya Veacheslavovich – e-mail: ilia159@mail.ru; phone: +74965652451; research assistant.

Elbakidze Andrey Vladimirovich – e-mail: elbakidze@mail.ru; phone: +74965652451; senior scientist.

УДК 222.22

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-16-26

Н.П. Заграй, Н.Н. Чернов, А.С. Жардецкая

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ТОНКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ПАРАМЕТРЫ ПОЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ*

Однородные по свойствам слои в жидких средах с толщинами от единиц миллиметров до десятков метров, разделенные друг от друга различными граничными прослойками с резкими изменениями термодинамических характеристик образуют область распространения и нелинейного взаимодействия волн акустической параметрической антенны. Тонкая структура ступенчатого характера наблюдается до самых больших глубин, однако величины амплитуд этих неоднородностей убывают с глубиной пропорционально уменьшению градиентов сглаженных профилей. Таким образом для акустической параметрической антенны, для которой среда распространения и нелинейного взаимодействия является

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-07-00374.

частью этой антенны помимо активного преобразователя накачки первичного поля, тонкая структура океана непосредственно будет влиять на формирование в пространстве ее поля. В случае тонкой горизонтальной структуры среды, в которой происходит распространение и нелинейное взаимодействие акустических волн, область такого взаимодействия может быть представлена совокупностью горизонтальных слоев, в каждом из которых физические и акустические параметры: линейные и нелинейные - постоянны. Существенными при этом могут оказаться граничные условия на переходах из одного слоя в другой. Если контактирующие среды являются жидкостями, то касательные напряжения на границах можно считать практически отсутствующими, что является упрощающим элементом решения задачи. Для структуры слоев твердотельных сред граничные условия обуславливают необходимость учета возможной граничной нелинейности. Теоретически рассмотрены случаи, когда область нелинейного взаимодействия есть совокупность горизонтальных слоев, с точностью до величин второго порядка малости, а так же определен вклад в общее поле акустической параметрической антенны результатов деятельности вторичных точечных источников в каждом из слоев. Исследован характер и степень влияния тонкой структуры на параметры акустической параметрической антенны. Полученные результаты и выводы исследований позволяют выявить основные практические приложения как для целей мониторинга, так и для контроля свойств дискретных слоистых сред.

Распространение звука; нелинейное взаимодействие; слоистые структуры; экологический мониторинг.

N.P. Zagray, N.N. Chernov, A.S. Zhardetskaya

TO THE ISSUE OF THE INFLUENCE OF A THIN BIOLOGICAL STRUCTURE ON PARAMETERS OF THE FIELD OF ACOUSTIC PARAMETRIC ANTENNA IN ECOLOGICAL MONITORING

Uniform in the properties of layers in liquid media with thicknesses from a few millimeters to tens of meters, separated from each other by different boundary layers with abrupt changes in thermodynamic characteristics form the region of propagation and nonlinear interaction of waves of an acoustic parametric antenna. A subtle structure of a stepped nature is observed up to the deepest depths, but the magnitude of the amplitudes of these inhomogeneities decrease with depth in proportion to the decrease in the gradients of the smoothed profiles. Thus, for an acoustic parametric antenna for which the propagation medium and nonlinear interaction is part of this antenna in addition to the active primary field pump transducer, the fine structure of the ocean will directly affect the formation of its field in space. In the case of a thin horizontal structure of the medium in which the acoustic waves propagate and the nonlinear interaction of acoustic waves, the region of such interaction can be represented by a set of horizontal layers, in each of which physical and acoustic parameters: linear and nonlinear are constant. The boundary conditions on transitions from one layer to another can turn out to be essential. If the contacting media are liquids, then the tangential stresses at the boundaries can be considered practically absent, which is a simplifying element of the solution of the problem. For the structure of layers of solid-state media, the boundary conditions make it necessary to take into account the possible boundary nonlinearity. Theoretically, cases are considered when the region of nonlinear interaction is a set of horizontal layers, up to second-order smallness, and the contribution of the secondary point sources in each layer to the general field of the acoustic parametric antenna is determined. The nature and degree of influence of the fine structure on the parameters of the acoustic parametric antenna are studied. The results and conclusions of the research allow us to identify the main practical applications both for monitoring purposes and for controlling the properties of discrete layered media.

Sound propagation; nonlinear interaction; layered structures; ecological monitoring.

Введение. Жидкие среды, как экологические – водоемы, моря и океаны, так и биологические ткани, [1–4] характеризуются наличием достаточно однородных по своим свойствам слоев с толщинами от единиц миллиметров до десятков метров, которые друг от друга разделены различными граничными прослойками с резкими изменениями термодинамических характеристик [5–7]. Вертикальные градиенты

физических свойств в этих прослойках могут превышать в 10–100 раз их средние значения. Вертикальный сдвиг скорости звука (C_3) на границах между слоями среды может превышать $5 \cdot 10^5$ см/с⁻¹. Различающиеся по своим физическим свойствам тонкие слои могут перемещаться в различных направлениях. Максимальные вертикальные градиенты температуры и солености в слоях толщиной менее 1 см составляют $0,1^\circ \text{C см}^{-1}$ и $0,025 \% \text{ см}^{-1}$. Часто встречаются участки с обратным знаком градиента – температурные инверсии, которые по величине на 1–2 порядка выше, чем самые большие градиенты.

Помимо непрерывного ортогонального изменения C_3 возможно дискретное представление среды совокупностью горизонтальных дискретных слоев [7–13], каждый из которых обладает своими физическими и акустическими линейными и нелинейными свойствами. Тонкая структура ступенчатого характера наблюдается до больших глубин, однако величины амплитуд убывают с глубиной пропорционально уменьшению градиентов сглаженных профилей.

Постановка задачи. Таким образом для акустической параметрической антенны, для которой среда распространения и нелинейного взаимодействия является частью этой антенны помимо активного преобразователя накачки первичного поля, тонкая структура среды распространения волн непосредственно будет влиять на формирование в пространстве ее поля. Исследование характера и степени влияния тонкой структуры на параметры акустической параметрической антенны (АПА) является важной теоретической и прикладной задачей. Рассмотрение ее расширяет круг знаний о физических процессах нелинейного взаимодействия волн акустического поля в слоистой среде. Несомненно, результаты и выводы исследований позволят выявить основные практические приложения как для целей локации, так и для контроля свойств дискретных слоистых сред [14–18].

Совокупность горизонтальных слоев как структура области нелинейного взаимодействия акустической параметрической антенны. Рассмотрим совокупность горизонтальных слоев как структуру области нелинейного взаимодействия акустической параметрической антенны.

В случае тонкой горизонтальной структуры среды, в которой происходит распространение и нелинейное взаимодействие акустических волн, область такого взаимодействия может быть представлена совокупностью горизонтальных слоев, в каждом из которых физические и акустические параметры: линейные и нелинейные – постоянны. Таким образом физическая модель рассмотрения заключается в определении вклада в общее поле АПА результатов деятельности вторичных точечных источников в каждом из слоев. Существенными при этом могут оказаться граничные условия на переходах из одного слоя в другой. Если контактирующие среды являются жидкостями, то касательные напряжения на границах можно считать практически отсутствующими [17–19], что является упрощающим элементом решения задачи. Для структуры слоев твердотельных сред граничные условия обуславливают необходимость учета возможной граничной нелинейности [19–21].

Теоретическое рассмотрение случая, когда область нелинейного взаимодействия (ОНВ) есть совокупность горизонтальных слоев, с точностью до величин второго порядка малости, может быть осуществлено решением неоднородного волнового уравнения, описывающего нелинейные взаимодействия акустических волн правая часть которого представляет собой плотности вторичных точечных источников q , появляющихся в результате взаимодействия акустических волн в каждом из соприкасающихся слоев:

$$\Delta P_i - \frac{1}{C_{0i}^2} \cdot \frac{\partial^2 P_i}{\partial t^2} = -\rho_{0i} \left[(\operatorname{div} \vec{V}_i)^2 + \vec{V}_i \Delta \vec{V}_i + \frac{1}{2} \Delta \vec{V}_i^2 \right] - \frac{1}{2C_{0i}^2} \left(\frac{\partial^2 P_i}{\partial \rho_i^2} \right)_{0s} \cdot \frac{\partial^2 (\rho_i - \rho_{0i})^2}{\partial t^2} = -4\pi q_i \quad (1)$$

Вид решения (1), определяющего вторичное поле волн комбинационных частот вдали от области нелинейного взаимодействия в любой точке пространства $M(x, y, z)$ в момент времени t , может быть представлен в виде запаздывающих потенциалов:

$$P(x, y, z, t) = \iiint_V \frac{1}{r} \cdot q \left(x', y', z', t - \frac{r}{C_0} \right) dx' dy' dz', \quad (2)$$

где r – расстояние между точками расположения источников и точкой наблюдения, (x', y', z') – координаты вторичных точечных источников.

Для совокупности дискретных плоскопараллельных горизонтальных слоев, в каждом из которых свои физические и акустические параметры, в рамках рассматриваемой физической модели, решение (2) принимает следующий вид:

$$P(x, y, z) = \sum_{i=1}^m \left[\iiint_V \frac{2 + B_i/A_i}{8\pi\rho_{0i}C_{0i}^4 r_0} \cdot q \left(x', y', t - \frac{r_0}{C_0} \right) dx' dy' dz' \right] = \sum_{i=1}^m \left\{ \iiint_V \frac{2 + B_i/A_i}{8\pi\rho_{0i}C_{0i}^4 r_0} (\omega_1 - \omega_2)^2 P_1 P_2 \times \cos \left[(\omega_1 - \omega_2) \left(t - \frac{r_0}{C_0} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta - 1)x' + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \right) y' \right] dx' dy' dz' \right\} \quad (3)$$

Откуда общий вид искомого решения (3) представляется как:

$$P(x, y, z) = \sum_{i=1}^m \left[\iiint_V D_i \cos(\alpha_i + \beta_i x' + \gamma_i y') dx' dy' dz' \right], \quad (4)$$

где $D_i = \frac{2 + B_i/A_i}{8\pi\rho_{0i}C_{0i}^4 r_0} (\omega_1 - \omega_2)^2 P_1 P_2$, $\alpha_i = (\omega_1 - \omega_2) \left(t - \frac{r_0}{C_0} \right)$,

$$\beta_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} (\cos \theta - 1), \quad \gamma_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} \sin \theta.$$

Интегрирование по всему объему области нелинейного взаимодействия осуществляется отдельно для каждого из слоев с соответствующими членами, определяющими параметры конкретного слоя. В результате выражение (4) может быть использовано для нахождения поля акустической параметрической антенны в рамках представляемой физической модели структуры ОНВ как совокупности горизонтальных слоев. Для удобства в декартовой системе координат размеры поршневого излучателя, имеющего прямоугольную форму, составляют $(a \times b)$ соответственно по координатам Y и Z . Распространение акустической волны происходит вдоль координаты X .

Двухслойная структура горизонтальных слоев среды в области нелинейного взаимодействия без учета затухания. Рассмотрим случай для двухслойной структуры горизонтальных слоев среды в области нелинейного взаимодействия без учета затухания. Для этой модели двухслойной структуры среды в ОНВ (рис. 1) запишем полученные выражения для давления в акустической волне разностной частоты (ВРЧ).

$$\begin{aligned}
P(x, y, z, t) &= D_1 \int_0^{l/2} \int_{-b/2}^{b/2} \int_0^{a_1} \cos(\alpha + \beta_1 x' + \gamma_1 y') dx' dy' dz' + \\
&+ D_2 \int_0^{l/2} \int_{-b/2}^{b/2} \int_{a_1}^{a_2} \cos(\alpha + \beta_2 x' + \gamma_2 y') dx' dy' dz' = I_1 + I_2 = \\
&= D_1 \cdot b \cdot \frac{4}{\beta_1 \gamma_1} \cdot \cos\left(\alpha_1 + \frac{l}{2} \beta_1 + \frac{a_1}{2} \gamma_1\right) \sin\left(\frac{l}{2} \beta_1\right) \sin\left(\frac{a_1}{2} \gamma_1\right) + \\
&+ D_2 \cdot b \cdot \frac{4}{\beta_2 \gamma_2} \cdot \cos\left(\alpha_2 + \frac{l}{2} \beta_2 + \frac{a_2 + a_1}{2} \gamma_2\right) \sin\left(\frac{l}{2} \beta_2\right) \sin\left(\frac{a_2 - a_1}{2} \gamma_2\right) = \\
&= \frac{4D_1 \cdot b}{\beta_1 \gamma_1} \cdot \cos\left(\alpha_1 + \frac{l}{2} \beta_1 + \frac{a_1}{2} \gamma_1\right) \sin\left(\frac{l}{2} \beta_1\right) \sin\left(\frac{a_1}{2} \gamma_1\right) + \\
&+ \frac{4D_2 \cdot b}{\beta_2 \gamma_2} \cdot \cos\left[\left(\alpha_2 + \frac{l}{2} \beta_2 + \frac{a_1}{2} \gamma_2\right) + \frac{a_2}{2} \gamma_2\right] \sin\left(\frac{l}{2} \beta_2\right) \sin\left(-\frac{a_1}{2} \gamma_2 + \frac{a_2}{2} \gamma_2\right)
\end{aligned} \tag{5}$$

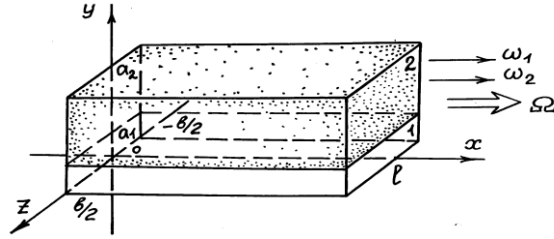


Рис. 1. Форма двухслойной горизонтальной области нелинейного взаимодействия АПА

Полученное выражение (5) для двухслойной структуры ОНВ является достаточно общим, так как учитывает различие всех акустических параметров контактирующих слоев.

Таким образом, в случае различия параметров в каждом из двух плоскопараллельных горизонтальных слоев в ОНВ исходных волн накачки, выражение, определяющее поле давления АПА на разностной частоте имеет вид двух слагаемых, каждое из которых соответствует вкладу в общее поле отдельно взятого горизонтального слоя:

$$\begin{aligned}
P(x, y, t) &= I_1 + I_2 = D_1 a_1 l \cdot b \frac{\sin(l/2 \cdot \beta_1)}{l/2 \cdot \beta_1} \cdot \frac{\sin(a_1/2 \cdot \gamma_1)}{a_1/2 \cdot \gamma_1} \cdot \cos\left(\alpha_1 + \frac{l}{2} \beta_1 + \frac{a_1}{2} \gamma_1\right) + \\
&+ D_2 (a_2 - a_1) l \cdot b \cdot \frac{\sin(l/2 \cdot \beta_2)}{l/2 \cdot \beta_2} \cdot \frac{\sin((a_2 - a_1)/2 \cdot \gamma_2)}{(a_2 - a_1)/2 \cdot \gamma_2} \cdot \cos\left(\alpha_2 + \frac{l}{2} \beta_2 + \frac{a_2 + a_1}{2} \gamma_2\right),
\end{aligned} \tag{6}$$

где обозначение соответствуют принятым ранее.

Полученное выражение показывает, что при принятых допущениях физической модели: наличия точечных источников в каждом слое при несущественности граничных условий на касательных поверхностях слоев жидкостей, результирующее поле ВРЧ АПА складывается из полей генерируемых вторичных точечных источников в каждом из слоев. При этом помимо присутствия в каждом слагаемом коэффициентов D_i с основными параметрами среды, они содержат объемы этих

слоев, функции типа $\frac{\sin e}{e}$ по каждому из характеристических размеров АПА в рассматриваемой плоскости: протяженности ОНВ – L , поперечного размера активного излучателя антенны – a_i с соответствующими волновыми размерами. В каждом из слагаемых присутствует член, содержащий временной фактор $\left(t - \frac{r_0}{C_{0i}}\right)$ с дополнительными слагаемыми, учитывающими фазовые соотношения между точечными источниками в двух горизонтально контактирующих слоях.

Таким образом оказывается возможным рассмотрение влияния тонкой горизонтальной структуры на формирование поля АПА.

Многослойная структура горизонтальных слоев в области нелинейного взаимодействия АПА. Рассмотрим теперь многослойную структуру горизонтальных слоев в области нелинейного взаимодействия АПА.

Сравнивая и анализируя полученные для поля давления ВРЧ выражения при ОНВ с двумя и тремя горизонтальными слоями, можно видеть закономерность формирования подобного выражения для многослойной структуры области нелинейного взаимодействия с горизонтальными жидкостными слоями различных свойств (рис. 2).

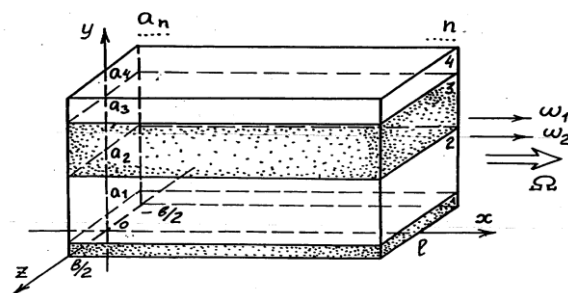


Рис. 2. Многослойная структура горизонтальных слоев в ОНВ акустической параметрической антенны (АПА)

Общее выражение поля давлений ВРЧ для многослойной структуры горизонтальных слоев в ОНВ для прямоугольного поршневого излучателя будет:

$$P(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^n D_m L \cdot b \cdot (a_n - a_{n-1}) \cdot \frac{\sin(\beta_m l/2)}{\beta_m l/2} \cdot \frac{\sin[(a_m - a_{m-1})\gamma_m/2]}{(a_m - a_{m-1})\gamma_m/2} \times \quad (7)$$

$$\times \cos\left[\left(\alpha_m + \frac{\beta_m l}{2}\right) + \frac{(a_m + a_{m-1})}{2} \gamma_m\right],$$

где $D_m = \frac{2 + B_m/A_m}{8\pi\rho_{0m}C_{0m}r_0} (\omega_1 - \omega_2)^2 P_1 P_2$, $\alpha_m = (\omega_1 - \omega_2) \left(t - \frac{r_0}{C_{0m}}\right)$, $\beta_m = \frac{2\pi}{\lambda_{-m}} (\cos\theta - 1)$,

$\gamma_m = \frac{2\pi}{\lambda_{-m}} \sin\theta$, m – число слагаемых от 1 до n , n – число горизонтальных слоев в

ОНВ, L – длина ОНВ, b – ширина области озвучивания в горизонтальном слое, a_n – толщина одного, двух или трех и т.д. в ОНВ горизонтальной слоистой дискретной слоистой структуры.

Полученное выражение позволяет определять направленность вторичного поля ВРЧ акустической параметрической антенны в случае тонкослойной структуры n -го количества горизонтальных слоев различных контактирующих сред в

области нелинейного взаимодействия исходных полей накачки. Результаты численного расчета ДН по полю ВРЧ для трехслойной системы горизонтальных слоев равных толщин $a = 0,1$ м и $F = 50$ кГц, при соотношениях плотностей $\rho_1:\rho_2:\rho_3 = 16,88:1,13: 1$, скоростей $C_1:C_2:C_3 = 1,37:1,15:1$ и параметров квадратичной нелинейности $(B/A)_1:(B/A)_2:(B/A)_3 = 11:5:3,1$ представлены на рис. 3.

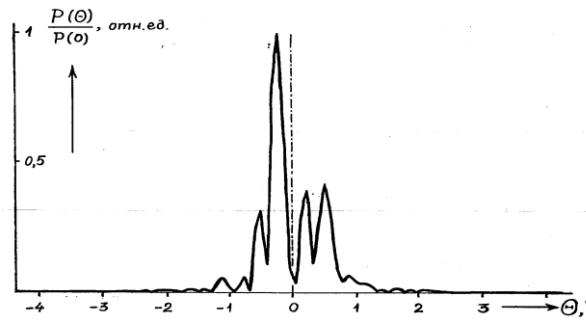


Рис. 3. Диаграмма направленности акустической параметрической антенны при дискретной структуре трех горизонтальных слоев в ОНВ

Результаты рассмотрения влияния линейного изменения скорости звука по глубине (рис. 4) в ОНВ на формирование диаграммы направленности (ДН) акустической параметрической антенны по полю ВРЧ приведены на рис. 5.

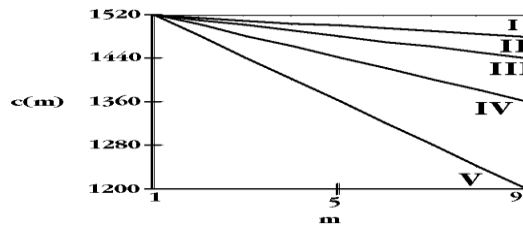


Рис. 4. Изменение скорости звука по глубине (I-V – номер слоя)

Линейное распределение скорости звука приводит к следующим изменениям: чем больше вертикальное изменение скорости звука, тем сильнее смещается главный лепесток ДН в сторону слоя с большей скоростью звука.

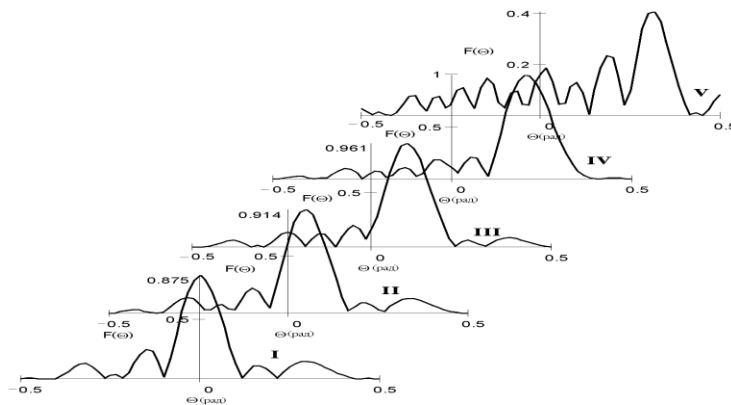


Рис. 5. Динамика изменения ДН АПА при изменении скорости звука в ОНВ

ДН при этом обладает как совпадающими, так и отличительными свойствами по сравнению с предыдущим случаем. Совпадающими оказывается сдвиг максимума ДН относительно оси излучения и появление дополнительных максимумов. Отличительными – малая асимметрия основного максимума ДН и большее количество близкорасположенных дополнительных максимумов, что обусловлено дискретностью свойств среды нелинейного взаимодействия [22].

Предложенный подход может быть применен на различные вариации свойств и размеров горизонтальных слоев, составляющих структуру области нелинейного взаимодействия АПА. При этом результаты исследований позволяют осуществлять анализ слоистых структур в ОНВ АПА, которые существенно изменяют пространственный характер ее излучения. Численный анализ по предложенной модели показывает ее приемлемость для описания подобных явлений для АПА, позволяет качественно оценить влияние на ДН АПА изменения того или иного характерного параметра среды а также позволяет указать ряд изменений в направленности поля АПА, что может служить основой ее использования как в расчетах по оценке условий и характерных изменений параметров при работе АПА в реальных средах, так и для структурной диагностики области среды, в которой при использовании АПА происходит нелинейное взаимодействие первичных акустических полей.

Вывод. Применение численных методов анализа полученных выражений не только существенно расширяют их возможности, но и становятся основой решения обратных задач синтеза структуры объема среды ОНВ.

Таким образом появляется возможность анализа и синтеза слоистой декретной среды горизонтальных слоев полем АПА с целью управления ее пространственной структурой или диагностики самой структуры среды, в которой происходят нелинейные взаимодействия акустических волн, а также определения возможных изменений характеристик АПА, используемых для структурной диагностики различных неоднородных сред. В результате возможно управление пространственной апертурой поля АПА или диагностики самой структуры тонкослойной среды в нелинейном приближении в целом и для акустических параметрических антенн в частности.

Заключение. Разработка методов и критериев их построения при нелинейном взаимодействии акустических волн в упруго-нелинейных средах представляется несомненно актуальной и важной задачей нелинейной акустики в экологическом мониторинге.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вареникова А.Ю., Лагута М.В. Мониторинг состояния прибрежных зон океана методом нелинейной акустической томографии // Международная научная конференция «Современные технологии и развитие политехнического образования»: Сб. трудов. 19-23 сентября 2016, г. Владивосток. – С. 743-746.
2. Лагута М.В. К вопросу решения обратной задачи акустической томографии // V Всероссийская молодежная школа-семинар «Инновации и перспективы медицинских информационных систем ИПМИС-2016»: Сб. трудов. 19-22 декабря 2016, г. Таганрог. – С. 65-68.
3. Лагута М.В., Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н. Измерение нелинейного параметра методом конечных амплитуд // V Всероссийская молодежная школа-семинар «Инновации и перспективы медицинских информационных систем ИПМИС-2016», 19-22 декабря 2016, г. Таганрог. – С. 80-84.
4. Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н. Визуализация внутренних структур биообъектов на основе 2-й гармоники ультразвуковых волн // Научно-практическая конференция «Нелинейная акустика-50»: Сб. трудов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 166-170.

5. *Заграй Н.П.* Нелинейные взаимодействия в слоистых и неоднородных средах: монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 433 с.
6. *Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н.* Визуализация внутренних структур биообъектов на основе нелинейного взаимодействия ультразвуковых волн со средой // Научно-практическая конференция «Нелинейная акустика-50»: Сб. трудов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 252.
7. *Акименко О.Б., Жардецкая А.С., Чернов Н.Н.* К вопросу о визуализации внутренних органов человека на основе нелинейности биотканей // Сб. трудов V Всероссийской молодежной школы-семинара «Инновации и перспективы медицинских информационных систем» ИПМИС-2016. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – С. 8-12.
8. *Заграй Н.П., Зарембо Л.К., Сердобольская О.Ю.* Исследование акустических нелинейных свойств собственного сегнетоэластика $\text{KN3}(\text{SeO}_3)_2$ // Кристаллография. – 1980. – Т. 25, вып. 4. – С. 787-794.
9. *Заграй Н.П.* Акустические колебания и волны в примерах и задачах: учеб. пособие. Минвуз РСФСР, Таганрогский радиотехнический ин-т, 1987. – 75 с.
10. *Zagray N., Alippi A., Scarano G.* Directivity Pattern of Parametrically Generated Acoustic Wave ITALI // *Il Nuovo Cimento*. – 1987. – Vol. 9D, No. 5. – P. 489-496.
11. *Заграй Н.П., Аббасов И.Б.* Рассеяние взаимодействующих плоских акустических волн на сфере // Акустический журнал. – 1994. – Т. 40, № 4. – С. 535-541.
12. *Zagray N.P.* The Secondary Field of Sum-Frequency Wave in the Scattering of Plane Waves // *from a Sphere Acoustical Physics*. – 1998. – Vol. 44, No. 1. – P. 97-99.
13. *Захаревич В.Г., Заграй Н.П., Обуховец В.А., Попов В.П.* Болонская декларация и задачи ТРТУ по ее реализации. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 65 с.
14. *Zagray N. P., Abbasov I.B.* Sphere scattering of nonlinearly interacting acoustic waves // *Fluid Dynamics*. – 1995. – Vol. 30, No. 2. – P. 158-165.
15. *Zagray N.P.* The Diagnositivity of the Medium Structure by Nonlinear Parameter as the Ratio of Wave Acceleration to the Particle Acceleration // 1995 International Simposium on the Non-linear Theory and its Appliations, NOLTA'95, December 1995, Las Vegas, Nevada, USA.
16. *Заграй Н.П.* Нелинейные взаимодействия в слоистых и неоднородных средах: монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 433 с.
17. *Заграй Н.П.* Нелинейные акустические параметры и динамика нелинейных процессов: учеб. пособие. Минобразования РФ, Таганрогский государственный радиотехнический университет. – Таганрог, ТРТУ, 2002, – 63 с.
18. *Zagray N.P.* Variation of the acoustic directivity pattern due to inhomogeneous objects in the region of nonlinear interaction 147th Meeting Acoustical Society of America // *The Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*. – May 2004. – Vol. 115, No. 5. Part. 2, 4pUW13. – P. 2493.
19. *Zagray N.P., Abbasov I.B.* The Secondary Field of Sum-Frequency Wave in the Scattering of Plane Waves from a Sphere // *Acoustical Physics*. – 1998. – Vol. 44, No. 1. – P. 97-99.
20. *Заграй Н.П., Аббасов И.Б.* Исследование вторичного поля волны суммарной частоты при рассеянии нелинейно-взаимодействующих плоских волн на сфере // Акустический журнал. – 1998. – Т. 44, № 1. – С. 116-118.
21. *Заграй Н.П.* О выделении нелинейных добавок третьего приближения // *Материалы научной конференции “Сессия Научного Совета РАН по акустике и XXV сессия РАО”*, 17- 20 сентября 2012 г. Ч. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – С. 13-21.
22. *Георги М.Ю., Заграй Н.П.* Моделирование и численное исследование системы горизонтальных плоскопараллельных слоев в области нелинейного взаимодействия акустической параметрической антенны. – Таганрог: ТРТУ.

REFERENCES

1. *Varenikova A.Yu., Laguta M.V.* Monitoring sostoyaniya pribrezhnykh zon okeana metodom nelineynoy akusticheskoy tomografii [Monitoring of the state of coastal zones of the ocean by the method of nonlinear acoustic tomography], *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Sovremennye tekhnologii i razvitie politekhnicheskogo obrazovaniya»: Sb. trudov. 19-23 sentyabrya 2016, g.* [International scientific conference "Modern technologies and development of polytechnic education": Collection of works. September 19-23, 2016, Vladivostok], pp 743-746.

2. *Laguta M.V.* K voprosu resheniya obratnoy zadachi akusticheskoy tomografii [On the solution of the inverse problem of acoustic tomography], *V Vserossiyskaya molodezhnaya shkola-seminar «Innovatsii i perspektivy meditsinskikh informatsionnykh sistem IPMIS-2016»*: *Sb. trudov. 19-22 dekabrya 2016, g. Taganrog* [V All-Russian Youth School-Seminar "Innovations and Perspectives of Medical Information Systems IPMIS-2016": Collection of works December 19-22, 2016, Taganrog], pp. 65-68.
3. *Laguta M.V., Varenikova A.Yu., Chernov N.N.* Izmerenie nelineynogo parametra metodom konechnykh amplitud [Measurement of the nonlinear parameter by the finite amplitude method], *V Vserossiyskaya molodezhnaya shkola-seminar «Innovatsii i perspektivy meditsinskikh informatsionnykh sistem IPMIS-2016»*, 19-22 dekabrya 2016, g. Taganrog [V All-Russian Youth School-Seminar "Innovations and Perspectives of Medical Information Systems IPMIS-2016", December 19-22, 2016, Taganrog], pp. 80-84.
4. *Varenikova A.Yu., Chernov N.N.* Vizualizatsiya vnutrennikh struktur bioob"ektov na osnove 2-y garmoniki ul'trazvukovykh voln [Visualization of internal structures of bioobjects based on the 2nd harmonic of ultrasonic waves], *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nelineynaya akustika-50»*: *Sb. trudov* [Scientific and Practical Conference "Nonlinear Acoustics-50": Collection of works]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 166-170.
5. *Zagray N.P.* Nelineynye vzaimodeystviya v sloistyykh i neodnorodnykh sredakh: monografiya [Nonlinear interactions in layered and inhomogeneous media: monograph]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 433 p.
6. *Varenikova A.Yu., Chernov N.N.* Vizualizatsiya vnutrennikh struktur bioob"ektov na osnove nelineynogo vzaimodeystviya ul'trazvukovykh voln so sredoy [Visualization of internal structures of bioobjects on the basis of nonlinear interaction of ultrasonic waves with the medium], *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nelineynaya akustika-50»*: *Sb. trudov* [Scientific and Practical Conference "Nonlinear Acoustics-50": Collection of works]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 252.
7. *Akimenko O.B., Zhardetskaya A.S., Chernov N.N.* K voprosu o vizualizatsii vnutrennikh organov cheloveka na osnove nelineynosti biotkaney [On the visualization of human internal organs on the basis of the nonlinearity of biological tissues], *Sb. trudov V Vserossiyskoy molodezhnoy shkoly-seminara «Innovatsii i perspektivy meditsinskikh informatsionnykh sistem» IPMIS-2016* [Collection of Proceedings of the V All-Russian Youth School-Seminar "Innovations and Perspectives of Medical Information Systems" IPMIS-2016]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, pp. 8-12.
8. *Zagray N.P., Zarembo L.K., Serdobol'skaya O.Yu.* Issledovanie akusticheskikh nelineynykh svoystv sobstvennogo segnetoelastika KN₃(SeO₃)₂ [Study of acoustic nonlinear properties of intrinsic ferroelastic KH₃ (SeO₃)₂], *Kristallografiya* [Crystallography], 1980, Vol. 25, issue 4, pp. 787-794.
9. *Zagray N.P.* Akusticheskie kolebaniya i volny v primerakh i zadachakh: ucheb. posobie. Minvuz RSFSR, Taganrofskiy radiotekhnicheskii in-t [Acoustic vibrations and waves in examples and problems: textbook. The Ministry of Higher Education of the RSFSR, Taganrog Radioengineering Institute], 1987, 75 p.
10. *Zagray N., Alippi A., Scarano G.* Directivity Pattern of Parametrically Generated Acoustic Wave ITALI, *Il Nuovo Cimento*, 1987, Vol. 9D, No. 5, pp. 489-496.
11. *Zagray N.P., Abbasov I.B.* Rasseyanie vzaimodeystvuyushchikh ploskikh akusticheskikh voln na sfere [Scattering of interacting plane acoustic waves on the sphere], *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustical Journal], 1994, Vol. 40, No. 4, pp. 535-541.
12. *Zagray N.P.* The Secondary Field of Sum-Frequency Wave in the Scattering of Plane Waves, *from a Sphere Acoustical Physics*, 1998, Vol. 44, No. 1, P. 97-99.
13. *Zakharevich V.G., Zagray N.P., Obukhovets V.A., Popov V.P.* Bolonskaya deklaratsiya i zadachi TRTU po ee realizatsii [Bologna Declaration and tasks of TRTU for its implementation]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004, 65 p.
14. *Zagray N. P., Abbasov I.B.* Sphere scattering of nonlinearly interacting acoustic waves, *Fluid Dynamics*, 1995, Vol. 30, No. 2, pp. 158-165.
15. *Zagray N.P.* The Diagnositivity of the Medium Structure by Nonlinear Parameter as the Ratio of Wave Acceleration to the Particle Acceleration, *1995 International Symposium on the Nonlinear Theory and its Appliations, NOLTA '95, December 1995, Las Vegas, Nevada, USA.*

16. *Zagray N.P.* Nelineynye vzaimodeystviya v sloistykh i neodnorodnykh sredakh: monografiya [Nonlinear interactions in layered and inhomogeneous media: monograph]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 433 p.
17. *Zagray N.P.* Nelineynye akusticheskie parametry i dinamika nelineynykh protsessov: ucheb. posobie. Minobrazovaniya RF, Taganrogskiy gosudarstvennyy radiotekhnicheskiy universitet [Nonlinear acoustic parameters and dynamics of nonlinear processes: textbook. Ministry of Education of the Russian Federation]. Taganrog, TRTU, 2002, 63 p.
18. *Zagray N.P.* Variation of the acoustic directivity pattern due to inhomogeneous objects in the region of nonlinear interaction 147th Meeting Acoustical Society of America, *The Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*, May 2004, Vol. 115, No. 5, Part. 2, 4pUW13, pp. 2493.
19. *Zagrai N.P., Abbasov I.B.* The Secondary Field of Sum-Frequency Wave in the Scattering of Plane Waves from a Sphere, *Acoustical Physics*, 1998, Vol. 44, No. 1, pp. 97-99.
20. *Zagray N.P., Abbasov I.B.* Issledovanie vtorichnogo polya volny summarnoy chastoty pri rasseyanii nelineynno-vzaimodeystvuyushchikh ploskikh voln na sfere [Investigation of the secondary field of the total frequency wave in the scattering of nonlinearly interacting plane waves on a sphere], *Akusticheskiy zhurnal [Acoustic Journal]*, 1998, Vol. 44, No. 1, pp. 116-118.
21. *Zagray N.P.* O vydelenii nelineynykh dobavok tret'ego priblizheniya [About the separation of nonlinear additives of the third approximation], *Materialy nauchnoy konferentsii "Sessiya Nauchnogo Soveta RAN po akustike i KhKhV sessiya RAO", 17-20 sentyabrya 2012 g.* [Proceedings of the scientific conference "Session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Acoustics and the XXV Session of the Russian Academy of Education", September 17-20, 2012], Part 2. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2012, pp. 13-21.
22. *Georgi M.Yu., Zagray N.P.* Modelirovanie i chislennoe issledovanie sistemy gorizontal'nykh ploskoparallel'nykh sloev v oblasti nelineynogo vzaimodeystviya akusticheskoy parametricheskoy anteny [Modeling and numerical study of a system of horizontal plane-parallel layers in the region of nonlinear interaction of an acoustic parametric antenna]. Taganrog: TRTU.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. В.В. Гривцов.

Заграй Николай Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: nzagray@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Чернов Николай Николаевич – e-mail: ega@fep.tti.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Жардецкая Анастасия Сергеевна – e-mail: anastasiya.zhardetskaya@gmail.com; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; магистрант.

Zagray Nikolay Petrovich – Southern Federal University; e-mail: nzagray@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr of eng. sc.; professor.

Chernov Nikolay Nikolaevich – e-mail: ega@fep.tti.ru; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr of eng. sc.; professor.

Zhardetskaya Anastasiya Sergeevna – e-mail: anastasiya.zhardetskaya@gmail.com; the department of acoustics and medical technology; undergraduate.