



УДК 681.883.67.001.24

С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Об особенностях частотных характеристик пьезокерамических пластин, связанных с коэффициентом электромеханической связи активного материала

Рассмотрена пьезопластина, излучающая рабочей стороной акустический сигнал в водную среду. Тыльная акустическая нагрузка отсутствует. Проведено исследование, касающееся применения понятий резонансной и антирезонансной частот излучателя указанного вида. Актуальность данного исследования вызвана необходимостью рассмотрения импульсного режима работы пьезопреобразователя в «привязке» длительности излучаемого сигнала к некоторой системе отсчета, которую можно было бы считать базовой, пригодной для решения подобных задач. Для этого удобно использовать частоту антирезонанса пьезопластины. Показана условность применения понятия антирезонансной частоты, определяемой с помощью упругого модуля из матрицы жесткостей пьезокерамики при постоянной электрической индукции. Тем не менее применение термина «антирезонанс», несмотря на его условность, не вызывает затруднений на практике. Это понятие позволяет определять частотные характеристики при различных значениях коэффициента электромеханической связи пьезоматериала.

Пьезоэлектрическая пластина, частота резонанса, частота антирезонанса, коэффициент электромеханической связи, водная среда

В настоящее время импульсный режим работы пьезоэлектрических преобразователей изучен достаточно глубоко. Однако актуальность продолжения исследований данной проблемы по-прежнему сохраняется. Важность обеспечения условий, способствующих возможности излучения и приема коротких акустических сигналов, объясняется стремлением разработчиков аппаратуры ультразвукового неразрушающего контроля к совершенствованию ее характеристик (мертвая зона, разрешающая способность, точность определения координат дефектов). При этом под коротким акустическим сигналом понимается импульс, длительность которого не превышает нескольких полупериодов колебаний высокой частоты. Использование столь коротких сигналов особенно актуально для задач локационного характера, с которыми достаточно часто приходится встречаться в различных областях прикладной акустики (неразрушающий акустический кон-

троль качества материалов, изделий и полуфабрикатов; ультразвуковая толщинометрия; гидролокация; медицинская диагностика и др.). Обширные библиографические данные по работе пьезопреобразователей (в том числе работающих в режиме излучения и приема сигналов малой длительности) представлены в работах [1]–[9].

В [8], [9] подробно исследован импульсный режим работы пьезопреобразователей различных типов (пластинчатые, цилиндрические, сферические). Основное внимание уделено не только исследованию особенностей импульсного режима, но и изучению возможности снижения длительности сигнала на выходе преобразователей и систем излучения-приема. В качестве математического аппарата использован спектральный метод на основе преобразований Фурье, а также метод Даламбера. При этом с целью получения большей общности решений применен единый подход к определению длительности сигналов на выходе

пьезопреобразователей. Авторы исходили из известных практических и теоретических представлений о том, что в режиме излучения наблюдается снижение частоты резонанса преобразователя при возрастании коэффициента электромеханической связи пьезокерамики β . Частотный сдвиг тем больше, чем больше значение β . Данное обстоятельство повлекло за собой необходимость рассмотрения импульсного режима работы преобразователя в «привязке» длительности импульса к определенной частоте, которая могла бы рассматриваться в качестве «неподвижной» точки отсчета. Например, для преобразователей пластинчатого типа в качестве такого базиса авторами [8] и [9] предложено использовать частоту антирезонанса. Длительность импульса определяется при этом с помощью безразмерного времени

$$T = \frac{t}{(T_0/2)}, \text{ где } t - \text{истинное (физическое) время, а } T_0 - \text{период колебаний пьезопластины на собственной (антирезонансной) частоте. В этом случае длительность излучаемого импульсного сигнала может быть выражена числом полупериодов колебаний на антирезонансной частоте пьезопластины. Эта частота обычно считается не изменяющей свое положение в зависимости от значения коэффициента электромеханической связи пьезоматериала. В качестве критерия, в соответствии с которым определялась длительность импульса на выходе преобразователя, в [8] и [9] принимался критерий } -20 \text{ дБ, т. е. время, прошедшее с начала импульса до момента, когда амплитуда сигнала спадает от максимального значения в десять раз. Именно такой критерий определения длительности сигнала довольно часто используется в реальных ситуациях, встречающихся в практике решения задач измерения и контроля.}$$

Авторы, желая более подробно изучить вопрос, связанный с особенностями частотных характеристик пьезопластин в зависимости от величины параметра β , провели исследование, изложению результатов которого посвящена настоящая статья. Возможно, представленный материал будет интересен разработчикам пьезоаппаратуры, применяемой в различных областях прикладной акустики для решения задач измерения и контроля.

Авторы, желая более подробно изучить вопрос, связанный с особенностями частотных характеристик пьезопластин в зависимости от величины параметра β , провели исследование, изложению результатов которого посвящена настоящая статья. Возможно, представленный материал будет интересен разработчикам пьезоаппаратуры, применяемой в различных областях прикладной акустики для решения задач измерения и контроля.

Рассмотрим некоторые теоретические положения, которые стали основой для проведения расчетного исследования.

Стоит отметить, что достаточно просто обстоит дело для преобразователей, электрическая схема-аналог которых представляет систему с сосредоточенными параметрами. В системе легко выделить участки и элементы цепей, ответственные за последовательный (напряжений) или параллельный (токов) резонанс. В первом случае для результирующего электрического сопротивления получаем минимум, соответствующий понятию «резонанс». Во втором случае имеем максимум результирующего электрического сопротивления, что соответствует понятию «антирезонанс».

Для систем с распределенными параметрами возникает более сложная ситуация. Будем рассматривать пьезоэлектрическую пластину, которая совершает продольные колебания по толщине. В этом случае квадрат коэффициента электромеханической связи пьезокерамики β^2 имеет вид

$$\beta^2 = \frac{e_{33}^2}{\epsilon_0 \epsilon_{33}^u c_{33}^D},$$

где e_{33} – пьезопостоянная; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ_{33}^u – диэлектрическая проницаемость пьезокерамики при постоянной деформации; c_{33}^D – упругий модуль из матрицы жесткостей пьезокерамики при постоянной электрической индукции D . В электрической схеме-аналоге упомянутый упругий модуль определяет скорость акустических волн в пьезокерамике:

$$c_3^D = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}},$$

где c_3^D – скорость распространения волн по толщине керамики (вдоль направления поляризации, обозначенного индексом 3); ρ – плотность пьезокерамики. Элементы схемы-аналога зависят от частотного аргумента $x = kl$, где $k = \omega/c_3^D$ – волновое число; l – толщина пластины.

На частоте резонанса ω_0 механического контура, определяемой для скорости c_3^D , т. е. при холостом ходе на электрической стороне, имеем

$$x_0 = k_0 l = \frac{\omega_0}{c_3^D} l = \pi. \text{ Это очень важный момент:}$$

для скорости c_3^D получается условие $k_0 l = \pi$.

Разработчикам пьезопреобразователей хорошо известно, что с ростом β^2 наблюдается понижение резонансной частоты преобразователя, т. е. она будет различной для разных значений коэффициента электромеханической связи пьезоматериала. Снижение резонансной частоты эквивалентно тому, что эффективная скорость акустической волны $c_{3\text{эф}}$ будет ниже, чем c_3^D : $c_{3\text{эф}} < c_3^D$.

Для скорости $c_{3\text{эф}} < c_3^D$ обозначим резонансную частоту $\omega_{\text{рез}}$. При постоянном размере пластины l теперь уже для $c_{3\text{эф}}$ будет выполняться условие $\frac{\omega_{\text{рез}}}{c_{3\text{эф}}}l = \pi$. Это соотношение говорит о том, что в амплитудно-частотной характеристике преобразователя следовало бы теперь использовать «новые координаты» (волновое число $k = \omega/c_{3\text{эф}}$). Однако поскольку для разных значений β^2 получаются разные значения $c_{3\text{эф}}$ и $\omega_{\text{рез}}$, которые, кстати, заранее не известны и их еще нужно определять, то получается, что нужна некоторая опорная, фиксированная база с известными скоростью c_3 и резонансной частотой, а скорость $c_{3\text{эф}}$ и резонансные частоты для произвольных значений β^2 следует выражать через упомянутые «базовые» значения. Очевидно, что за «базовые» следует принять величины c_{33}^D и c_3^D .

Таким образом, для заданного значения β^2 имеем две частоты: более низкую для резонанса ($\omega_{\text{рез}}$) и более высокую, соответствующую значению $\beta^2 = 0$ (и скорости c_3^D). Поскольку эта частота не имеет строго установленного названия, то ее нередко называют антирезонансной, понимая из контекста, о чем идет речь.

Чтобы несколько прояснить описанную ситуацию, рассмотрим особенности частотных характеристик и их взаимосвязь. К задаче можно подходить с разных точек зрения. Например, с точки зрения пользователя, на первый план выходит вопрос о резонансной частоте и форме частотной характеристики колебательной скорости на границе пластины с нагрузкой (водой). В то же время для проектировщика генератора важна частотная характеристика входного электрического сопротивления преобразователя (т. е. нагрузка на генератор).

Остановимся на точке зрения пользователя. Пусть пластина тыльной стороной нагружена на среду с удельным акустическим импедансом z_d (демпфер), а рабочей стороной – на воду с удельным акустическим импедансом z_b . Заметим, что при $z_d = 0$ имеем односторонне нагруженную пьезопластину.

Формулы для колебательных скоростей на гранях пьезопластины (и их вывод) приведены в [8]. Для скорости на границе с водой имеем

$$v = -\left(\frac{k_U U}{Z_K}\right) F(x).$$

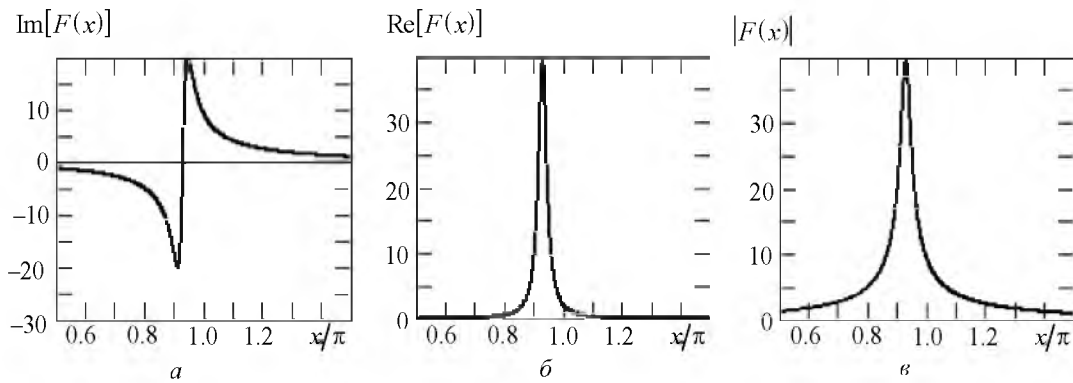
Здесь k_U – коэффициент электромеханической трансформации; U – рабочее электрическое напряжение; $Z_K = z_K S$ – полное механическое сопротивление пьезокерамики (z_K – удельный акустический импеданс пьезокерамики), S – площадь рабочей грани; $x = \frac{\omega}{c_3} l$ – частотный аргумент для пьезокерамики;

$$F(x) = \frac{A}{B + C},$$

$$\text{где } A = 1 - \cos x - j \frac{z_d}{z_K} \sin x; \quad B = \left(\frac{z_d}{z_K} + \frac{z_b}{z_K} \right) \times \\ \times \left(\cos x - \frac{\beta^2}{x} \sin x \right); \quad C = j \left[\left(1 + \frac{z_b z_d}{z_K^2} \right) \sin x - \right. \\ \left. - \frac{2\beta^2}{x} (1 - \cos x) \right].$$

Будем рассматривать случай, когда $z_d = 0$ (односторонняя нагрузка). В качестве пьезоматериала выберем пьезокерамику ЦТСНВ-1 ($z_K = 30 \cdot 10^6$ Па · с/м); удельный акустический импеданс воды $z_b = 1.5 \cdot 10^6$ Па · с/м.

По приведенным формулам на ЭВМ рассчитывались частотные характеристики колебательной скорости с точностью до постоянного множителя (функции $F(x)$). Вычисления $\Delta x = 0.001\pi$ проводились в цикле с шагом. На экран выводились графики величин, пропорциональных: $\text{Im}[F(x)]$ – реактивной составляющей скорости; $\text{Re}[F(x)]$ – активной составляющей скорости; $|F(x)|$ – модулю колебательной скорости. Для удобства о вышеприведенных величинах будем говорить в терминах колебательной скорости. На рисунке пред-



ставлены реактивная (а) и активная (б) составляющие колебательной скорости, а также ее модуль (в). Расчет проведен для случая $\beta^2 = 0.17$, что соответствует значению коэффициента электро-механической связи для пьезокерамики ЦТСНВ-1, являющейся одним из наиболее эффективных пьезоматериалов. При расчете частотных зависимостей реактивной составляющей колебательной скорости пьезопластины на границе с водой, при разных значениях квадрата коэффициента электро-механической связи β^2 обнаружено, что они имеют сходную форму и одинаковые особенности. Для рассматриваемого диапазона изменения β^2 , определяемого неравенством $0 < \beta^2 < 0.17$, графики имеют большой по модулю отрицательный локальный экстремум, т. е. минимум (при $x = x_{\min}$), после которого следует уменьшение модуля и возрастание до положительного максимума (при $x = x_{\max}$), практически равного по модулю отмеченному минимуму. Затем идет плавный спад почти до нуля. Точки, в которых происходит изменение знака, соответствуют равенству нулю реактивной составляющей, т. е. резонансу. Из графиков для $\text{Re}[F(x)]$ и $|F(x)|$ следует, что их максимумы располагаются точно на частоте резонанса и равны по величине. Результаты расчета некоторых представляющих интерес параметров приведены в таблице. Из нее следует, что частота резонанса соответствует середине отрезка $[x_{\min}, x_{\max}]$, т. е. $x_{\text{рез}} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}$. Интервал

по частоте между $x_{\min}$ и $x_{\max}$, как следует из таблицы, находится в пределах $\Delta x = x_{\max} - x_{\min} = [(0.032), \dots, (0.034)]\pi$.

Интересно отметить, что в точках, где достигаются максимум и минимум реактивной составляющей, значения модулей колебательной скорости практически равны ($|F(x_{\min})| \approx |F(x_{\max})|$) и, более того, на уровне 0.7 от $|F(x_{\text{рез}})|$, т. е. на уровне, определяющем ширину полосы пропускания, при односторонней нагрузке на воду $\Delta x/x_{\text{рез}} \approx 0.034$, т. е. 3.4 %.

Рассмотрим также свойства графиков зависимости активной составляющей $\text{Re}[F(x)]$ и модуля $|F(x)|$ колебательной скорости на рабочей грани пьезопластины.

Случай 1. Пусть $\beta^2 = 0$. Это соответствует материалу с очень малым значением коэффициента связи. Максимальное значение $\text{Re}[F(x)]_{\max} = 40$ при $x = \pi$. Аналогично для $|F(x)|$ имеем $|F(x)|_{\max} = 40$ при $x = \pi$. Это понятно, так как на частоте резонанса $\text{Im}[F(x)] = 0$. Для активной (вещественной) составляющей скорости определяем из расчетного графика точки с уровнем 0.7 от максимального значения. Находим, что $\text{Re}[F(x)]_{0.7} = 28.679$ при $x = 0.990\pi$ и $\text{Re}[F(x)]_{0.7} = 28.681$ при $x = 1.010\pi$. Видно, что для графика зависимости $\text{Re}[F(x)]$ значения по уровню 0.7 распо-

β^2	Расчетные параметры				
	$x_{\min}/\pi$	$x_{\max}/\pi$	$x_{\text{рез}}/\pi$	$\text{Im}[F(x_{\min})]$	$\text{Im}[F(x_{\max})]$
0	0.984	1.016	1	-20.012	20.012
0.01	0.980	1.012	0.996	-20.016	20.009
0.04	0.967	1.000	0.983	-20.021	19.997
0.09	0.946	0.979	0.962	-20.038	19.979
0.17	0.909	0.945	0.927	-20.072	19.955

лагаются симметрично относительно частоты резонанса: $x_{0.7} = x_{\text{рез}} \pm 0.01\pi$. Относительная ширина полосы пропускания для $\text{Re}[F(x)]$ составляет 2 %. Что касается уровня 0.7 для графика зависимости $|F(x)|$, то находим, что

$$|F(0.984\pi)|_{0.7} = 28.21; |F(1.016\pi)|_{0.7} = 28.26.$$

Значения $|F(x)|$ в этих точках практически равны, а соответствующие частоты являются определенными ранее x_{min} и x_{max} . Относительная ширина полосы пропускания составляет $\frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{x_{\text{рез}}} \cdot 100 = 3.2 \%$. Видно, что для графика

зависимости $|F(x)|$ полоса пропускания (3.2 %) оказывается шире, чем для $\text{Re}[F(x)]$ (для этого случая она составляла 2 %). Также полезно отметить роль, которую играют максимумы модуля реактивной составляющей колебательной скорости в точках x_{min} и x_{max} : их расположение определяет не только частоту резонанса, но и полосу пропускания.

Случай 2. Пусть теперь $\beta^2 = 0.04$. Данный случай рассматривается в связи с тем, что при этом коэффициенте электромеханической связи $\frac{x_{\text{max}}}{\pi} = 1.000$, что соответствует частоте антирезонанса; $\text{Re}[F(x)]_{\text{max}} = 39.964$ при $x = 0.984\pi$, т. е. соответствует резонансной частоте; максимум модуля колебательной скорости $|F(x)|_{\text{max}} = 39.982$ при $x = 0.984\pi$. Максимум модуля колебательной скорости и максимум активной составляющей совпадают на частоте резонанса. Уровень 0.7 для модуля колебательной скорости соответствует частоте $x_{\text{min}} = 0.967\pi$: $|F(x)|_{0.7} = |v(0.967\pi)| = 27.993$. Вторая точка уровня 0.7 соответствует частоте $x_{\text{max}} = \pi$, здесь $|F(\pi)| = 28.023$. Ширина полосы пропускания составляет 0.033π или 3.3 %.

Расчет для других значений β^2 , представленный в таблице, дает аналогичные результаты.

Из таблицы видно, что с увеличением параметра β^2 значения x_{min} и x_{max} смещаются в сторону более низких частот. При этом, если при $\beta^2 = 0$ значение $x_{\text{max}} > \pi$, то при $\beta^2 = 0.04$ $x_{\text{max}} = \pi$, и при дальнейшем увеличении β^2 $x_{\text{max}} < \pi$. Поэтому нельзя говорить о некоторой единой частоте для x_{max} , лежащей выше частоты резонанса. Тем не менее упомянутые значения x_{max} на частотных характеристиках оказываются ближе к $x = \pi$, чем точки, соответствующие резонансам. Поэтому частоту $x = \pi$ условно (но не строго) можно (также для удобства) отождествить с частотой антирезонанса, учитывая ее роль как опорной частоты для расчета резонансных частот в зависимости от значений β^2 . Расчет резонансной частоты дает возможность использовать полученный результат для исследования формы и длительности сигнала на выходе преобразователя при работе в импульсном режиме.

Таким образом, расчетно-теоретическим путем на примере пластинчатого пьезопреобразователя проведено исследование, посвященное правомерности применения понятий резонансной и антирезонансной частот. Решение задачи представлено для случая, соответствующего применению пластины, односторонне нагруженной на воду. Показано, что применение понятия антирезонансной частоты, определяемой с использованием упругого модуля c_{33}^D , условно, но оно позволяет рассчитывать частотные характеристики для различных значений квадрата коэффициента электромеханической связи. Несмотря на условность термина «антирезонанс», его применение на практике не вызывает затруднений.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) за полезные дискуссии.

Исследование выполнено в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» базовой части государственного задания Минобрнауки России, код проекта: 8.6743.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.

2. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: справ.: в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / под общ. ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004.

3. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 256 с.

4. Ультразвуковые преобразователи / под ред. Е. Кикучи; пер. с англ. М.: Мир, 1972. 424 с.

5. Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях // Физическая акустика / под ред. У. Мэзона; пер. с англ. М.: Мир, 1966. Т. 1. С. 204–324.

6. Королев М. В., Карпельсон А. Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: Машиностроение, 1982. 157 с.

7. Гитис М. Б. Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения // Дефектоскопия. 1981. № 2. С. 65–84.

8. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.

9. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Физические основы работы и проектирования импульсных пьезопреобразователей в задачах измерения и контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.

S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ABOUT THE FEATURES OF THE FREQUENCY RESPONSES OF PIEZOCERAMIC PLATES ASSOCIATED WITH THE VALUE OF THE ELECTROMECHANICAL COUPLING FACTOR OF THE ACTIVE MATERIAL

The piezoceramic plate projecting by the working side an acoustic signal in the aqueous media is considered. The back side of the plate is not loaded. A study on the application of the concepts of resonance and antiresonance frequency of the radiator is specified. The relevance of this study is caused by necessity of consideration of pulse mode of operation of the piezoelectric transducer in the "binding" the duration of the radiated signal to a reference system, which could be considered as «fixed». This system can be used for solving similar tasks. It is convenient to use for this purpose the term of «antiresonance frequency» of a piezoceramic plate. The arbitrariness of the concept of anti-resonance frequency, using the term of elastic modulus of the stiffness matrix of piezoelectric ceramic at constant electric displacement is shown. However, the use of the term "antiresonance", despite its arbitrariness, does not cause any problem in practice. This concept allows to define the frequency responses for different values of the electromechanical coupling factor of the piezomaterial.

Piezoelectric plate, resonance frequency, antiresonance frequency, electromechanical coupling factor, water medium

УДК 621.373, 681.883.6

И. С. Пестерев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Система формирования импульсных сигналов для возбуждения сверхширокополосных гидроакустических преобразователей

Рассмотрена концепция построения многоканальной системы возбуждения широкополосных гидроакустических преобразователей стержневого и волноводного типов, обеспечивающая возможность излучения коротких акустических импульсов и сигналов сложной формы. Показан принцип формирования системой электрических сигналов возбуждения, основанный на программной реализации решения задачи синтеза для заданных структурных параметров преобразователя и требуемой формы акустического сигнала с последующим цифроаналоговым преобразованием полученных массивов цифровых данных. Описан механизм управления и функциональные особенности системы, а также результаты ее испытаний в импульсном режиме работы с учетом нагруженности на реальные преобразователи, образующие антенную решетку. Указаны основные направления совершенствования электронной аппаратуры системы возбуждения с целью дальнейшего повышения быстродействия и выходной мощности, увеличения длины синтезируемых сигналов, а также расширения рабочего диапазона частот.

Цифроаналоговое преобразование сигналов, широкополосный усилитель, импульсные сигналы, синтез частотных характеристик, широкополосный преобразователь, компьютерное моделирование

Для решения широкого спектра задач гидроакустики, в частности для повышения разреша-

ющей способности эхолокационных гидроакустических систем и расширения возможностей их