

Акустичні та мультимедійні системи

УДК 534.6

В.С. Дидковский, А.В.Коржик

Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев

МНОГОМОДОВЫЕ СИСТЕМЫ В ЗАДАЧАХ ЗВУКОПОДВОДНОЙ СВЯЗИ

В работе предложен один из возможных подходов к формулировке, постановке и решению задачи формирования звуковых полей в мелком море с учетом многомодовости и многосвязности основных физических полей передающих и приемных устройств абонентов звукоподводной связи. Устройства предполагаются выполненными из пьезокерамических преобразующих элементов, представленных колебательными системами с распределенными параметрами с различными видами электродирования, работающими в условиях реального электрического нагружения. Постановка предполагает использование метода частичных областей в части структурирования рабочего пространства задачи, описание нормальных волн в волноводном канале с комбинированными границами путем решения задачи Штурма-Лиувилля, применение положений о критериях ближних и дальних полей и условиях собственно мелкого моря, а также замену граничных условий на поверхностях преобразующих систем - условиями сопряжения.

Ключевые слова: звукоподводная связь, мелкое море, многомодовые преобразующие системы, краевая задача, сферическая оболочка, цилиндрическая оболочка, условия сопряжения.

Введение

Вопросы применения гидроакустических коммуникационных средств в условиях мелкого моря охватывают значительный круг проблем, связанных с модельными представлениями канала связи. Появление в последнее время ряда достаточно большого количества работ, посвященных проблемам передачи акустических сигналов в мелком море (например, работы [1 – 6]), говорит о возросшем интересе к развитию этого направления и стимулирует расширение исследований в части сопряжения особенностей работы аппаратной части и забортных устройств с условиями морской среды.

Кроме того, представляется рациональной попытка создания физико-математической модели ситуации и условий передачи-приема сообщения по каналу звукоподводной связи в соответствии с алгоритмом сквозного подхода – от электрического сигнала на выходе задающего устройства канала передачи и далее по каналу распространения до электрического напряжения на нагрузке преобразователя (сумматор или демодулирующее устройство).

Действительно, на сегодня наработан значительный объем волновых задач из области стационарной гидроэлектроупругости, в связи с чем упомянем работы Гринченко В.Т., Улитко А.Ф. [7], Петрищева О.Н. [8], Савина В.Г. [9], а также работы [10 – 13].

Указанные источники посвящены исследованиям особенностей работы обратимых гидроакустических преобразователей, что позволяет, опираясь на проблематику сквозных задач и традиционных

задач акустики мелкого моря, предложить одну из возможных постановок, предполагающую:

- определение источника в привязке к основным типам антенных устройств средств звукоподводной связи в виде цилиндрических или сферических пьезокерамических преобразователей;
- замену граничных условий условиями сопряжения для преобразующих устройств;
- учет месторасположения преобразователей абонентов;
- учет свойств границ канала распространения.

Таким образом, целью предлагаемой работы является – определение одного из возможных подходов к формулировке, постановке и определению основных направлений решения задачи формирования звуковых полей в условиях мелкого моря с учетом связанности акустических, механических и электрических полей в забортных оконечных устройствах приемо-передающих трактов средств звукоподводной связи, которые выполнены в виде многомодовых колебательных систем с распределенными параметрами.

Постановка задачи

Среда и условия работы

Рассматривается работа в морской среде двух абонентов связи (рис. 1), имеющих однотипные (в части способа преобразования энергии и их пространственно-энергетических характеристик) передающие и приемные оконечные забортные устройства, которые размещены на горизонтах h_1 , h_p соответственно.

Предполагается, что среда представляется идеальной малосжимаемой жидкостью с плотностью ρ и скоростью звука \bar{c} , а также первоначально характеризуется изотермией и, соответственно, нулевым градиентом скорости звука $\text{grad } c = \frac{\Delta c}{\Delta z} = 0$.

При этом условия акватории соответствуют условиям мелкого моря в волновом (ситуативном) [14] и гидрографическом [15] смысле (рис. 1, а).

Иными словами, должно выполняться неравенство

$$r \geq \frac{H^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где r – расстояние между абонентами;

H – глубина моря;

λ – длина волны на выбранной нижней частоте совокупности частот сообщения.

Преобразующие устройства являются окончательными для приемо-передающих трактов (рис. 1, б) и в совокупности с ними, а также с морской средой (канал распространения) образуют канал звукоподводной связи. При этом режимы работы средств звукоподводной связи, методы модуляции и демодуляции, а также стандарты и протоколы связи пока не определены. Однако, предполагается, что передаче подлежит совокупность частот, обусловленная голосовым сообщением оператора (режим телефонии – “ТЛФ”) в течение некоторого временного интервала.

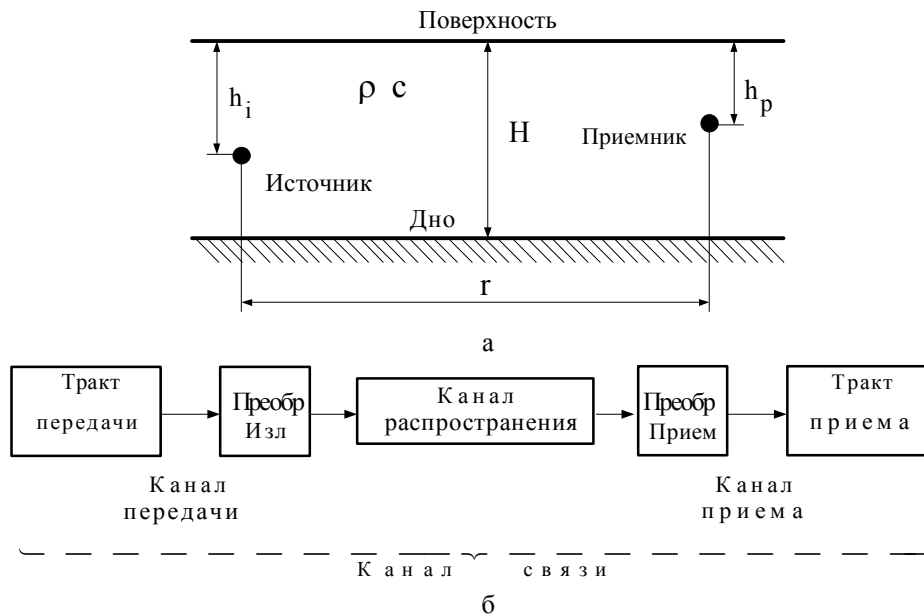


Рис. 1. Схема размещения абонентов и общая структура канала связи

Безусловно, даже использование модели Пекариса [16] в традиционных постановках задач распространения звука в волновых каналах с учетом выбора типа, особенностей размещения и режима работы источника или приемника (например, работы [7, 8, 17 – 21]), само по себе приводит к достаточно строгому и сложному решению, которое, тем не менее, не учитывает ряда важных обстоятельств.

Эти обстоятельства (скажем, для режима передачи) состоят в следующем:

- как правило, способы задания источника звука на вертикальной оси-сечении волноводного звукового канала z – ограничиваются [5, 6, 17 – 19] стремлением к монополюсному представлению, использованию цилиндрических источников бесконечной длины, заданию фиксированного распределения давления или колебательной скорости вида – Const, дельта-функции Дирака $\delta(z)$, а также функций $\cos(z)$, $\sin(z)$, что несколько обедняет постановку и ограничивает рабочий частотный диапазон;

- граничные условия на поверхности источника (приемника) и его конструктивного оформления соответствуют каноническим представлениям в виде краевых задач Дирихле, Неймана, а также задач импедансного (смешанного) типа [17, 20], что приводит к их идеализации;

- условия возбуждения поля в волноводе требуют дальнейшей конкретизации в части оценки ближнего поля источника определенной физической природы с учетом его пространственно-энергетических качеств, сопряжения с рабочим пространством сечения волноводного канала (канала распространения), а также необходимости формирования в нем требуемой суперпозиции нормальных волн;

- в рамках решения задачи Штурма-Лиувилля коэффициенты возбуждения нормальных волн в волноводном канале могут быть получены лишь в случае ортогональности и полноты используемых для описания источника волновых функций на интервале $0 \leq z \leq H$;

– использование многомодовых колебательных систем и учет связанности собственных форм колебаний может существенно видоизменять структуру акустического поля для областей Френеля и Фраунгофера, а следовательно и характеристики самого канала связи.

Все вышесказанное в равной степени относится и к приемной части задачи – от акустического поля к электрическому сигналу на выходе приемного преобразователя (тракта).

В связи с этим полагаем, что источник и приемник звука могут быть представлены парами электроупругих преобразователей, выполненных в виде

тонкостенных пьезокерамических цилиндрических либо сферических оболочек с электродированными поверхностями. Электроды преобразователей подключены к соответствующим трактам. При этом формирование поля при передаче сообщения может происходить в направлениях как “плюс”, так и “минус” бесконечность. Однако, в целях упрощения задачи предлагается рассматривать лишь окрестность преобразователей и область волнового канала между абонентами (рис. 1, а, рис. 2, рис. 3).

Волноводный канал представляется плоскопараллельным и бесконечным по длине (рис. 1 – 3). Сечение канала определяется глубиной моря H .

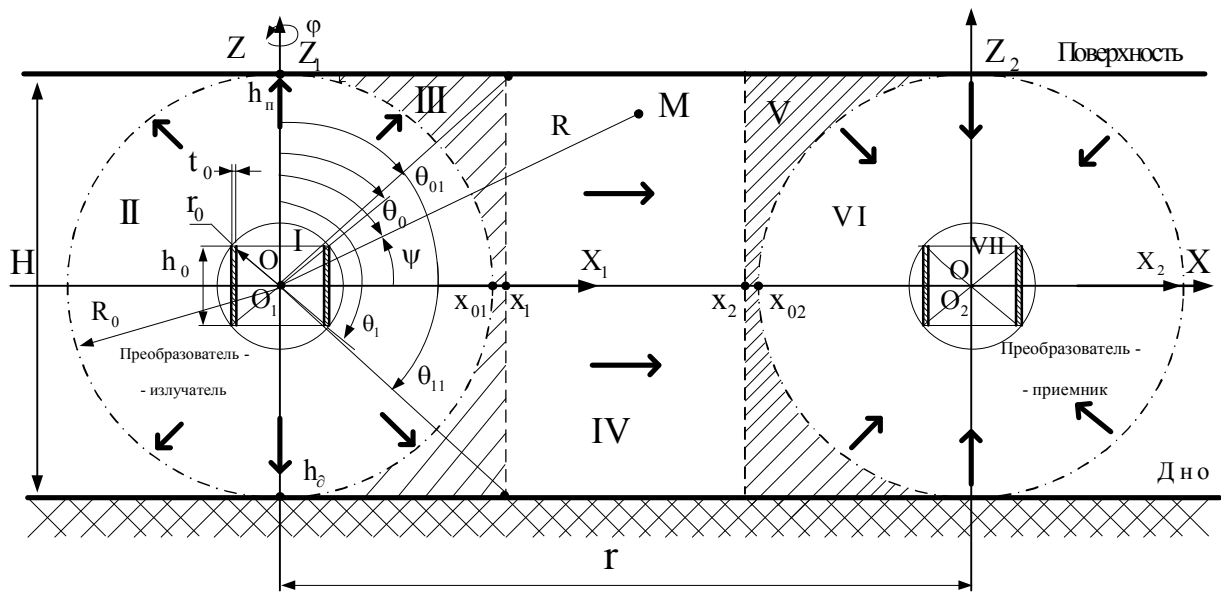


Рис. 2. Координатные системы и частичные области задачи (цилиндрический преобразователь)

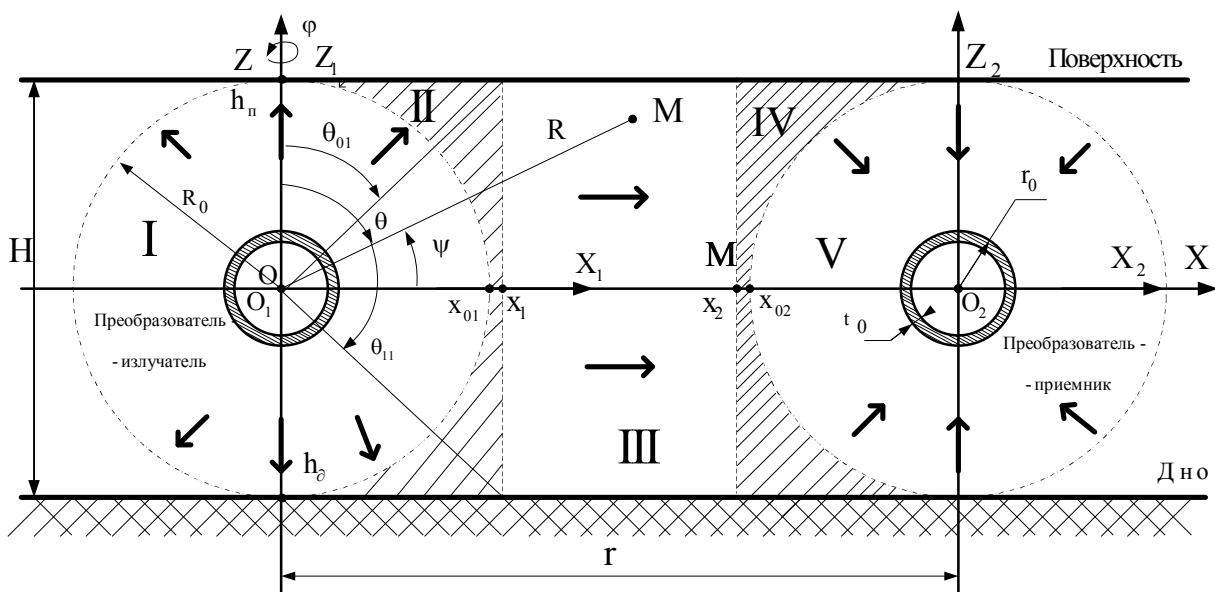


Рис. 3. Координатные системы и частичные области задачи (сферический преобразователь)

Системы координат и частичные области

Во многих работах, посвященных изучению акустических полей в волноводах, используются цилиндрические или декартовы системы координат (например, [3, 18, 19]). При этом для плоскопараллельных волноводов цилиндрические координаты вырождаются в полярные.

Между тем, методология волновых задач акустики предполагает использование в постановках таких координатных систем, которые наиболее полно отражают геометрию источника звука (либо приемника, либо рассеивателя) и окружающего рабочего пространства.

Заметим также, что привлечение преобразователя, выполненного в виде пьезокерамических оболочек одной из указанных геометрических форм, определяется рядом особенностей, среди которых отметим такие:

- выполнение условия (1) с учетом соотносительности габаритов преобразователя, рабочих глубин и расстояния между абонентами с длинами волн соответствующих частотных составляющих сообщения;
- соответствие геометрических форм преобразователей выбранным системам координат;
- возможность формирования в волноводном канале нормальных волн желаемого номера (в том числе и их суперпозиции), способ возбуждения и передачи которых определяется как свойствами канала, так и возможностями электро-механической активации соответствующих собственных форм колебаний (или их совокупности) оболочки выбранной формы.

Рассмотрим использование предложенных оболочек цилиндрической и сферической форм в предлагаемой постановке задачи (рис. 2, 3).

Цилиндрический преобразователь

Полагаем, что в плоскопараллельный волновой канал с комбинированными границами в качестве передающего и принимающего устройств введены круговые цилиндрические преобразователи (рис. 2). Каждый преобразователь представлен круговым цилиндром конечной длины (длина образующей h_0), который выполнен в виде тонкостенной электроупругой оболочки толщиной t_0 . Оболочка выполнена из пьезоматериала с плотностью ρ_0 и скоростью звука c_0 .

Введем ряд координатных систем:

- общую декартову систему координат XOZ с началом координат O в плоскости сечения волновода, который совпадает с геометрическим центром преобразователя-излучателя;

- локальные декартовы системы координат $X_1O_1Z_1$ и $X_2O_2Z_2$ с началом координат O_1 и O_2 в

плоскостях сечений волновода в точках расположения геометрических центров излучателя и приемника соответственно;

- общую цилиндрическую систему координат $R\varphi Z$, которая может быть приведена к полярной системе;

- локальные сферические системы координат $R_1\varphi_1\theta_1$ и $R_2\varphi_2\theta_2$, приведенные к центрам O_1 и O_2 соответствующих систем декартовых координат. Локальные сферические координаты в силу геометрии задачи могут быть сведены к полярным системам вида $R_1\theta_1$, $R_2\theta_2$.

Вводя локальные сферические координаты, заметим, что образующая цилиндра аппроксимируется экваториальным сферическим поясом.

В соответствии с методом частичных областей [20, 21] введем области I, II, III, IV, V, VI, VII (рис. 2), каждая из которых имеет особенности, связанные с представлением звуковых полей. Считаем, что сочетание малой толщины цилиндрической оболочки и ее образующей позволяют считать оболочку короткой в волновом отношении.

Границы областей при этом могут быть определены как:

$$\text{Область I: } r \leq r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

$$\text{Область II: } r_0 \leq r \leq R_0, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

$$\text{Область III: } \begin{cases} x_0 \leq r \leq x^2 + z^2 = x_0^2, & 0 \leq \theta \leq \pi, \\ z \leq H, & 0 \leq \varphi \leq 2\pi. \end{cases}$$

$$\text{Область IV: } x_1 \leq x \leq x_2, \quad z \leq H, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Заметим, что область V построена в системах координат приемника аналогично области III, а области VI, VII – аналогично областям I, II.

Под воздействием внешнего электрического напряжения, приложенного к нанесенным на внешнюю и внутреннюю поверхности оболочки электродам, она совершает колебания, характер и модовый состав которых определяется способом электродирования и частотой приложенного напряжения. Сами электроупругие колебания излучателя описываются в рамках сквозной задачи совокупностью уравнений состояния для пьезокерамики, уравнений движения тонких цилиндрических оболочек, соотношений Коши для перемещений и деформаций, системы упрощенных уравнений Максвелла для пьезокерамических тел и уравнений внешней нагрузки в виде уравнения Гельмгольца [7, 8]. При этом внешней нагрузкой полагаем акустическое давление, создаваемое колеблющейся оболочкой в областях I, II и III.

Используя базовые положения [20, 21], рассмотрим представления акустических полей в частичных областях. Так, учитывая переход $p = -i\omega\Phi$, акустическое поле в областях I запишем в виде:

$$p = \begin{cases} p_I = -i\omega\rho \times \\ \times \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm} P_n^m(\cos\theta) \cos(m\varphi) j_n(kr); & r \leq r_0 \\ p_{II} = -i\omega\rho \times \\ \times \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} B_{nm} P_n^m(\cos\theta) \cos(m\varphi) \times & r \geq r_0 \\ \times (C_n i_n(kr) + D_n n_n(kr)); \end{cases} \quad (2)$$

где Φ – потенциал скорости;

$A_{nm}, B_{nm}, D_n, \tilde{N}_n$ – неизвестные комплексные коэффициенты, $n = 0, 1, 2, \dots$ $m = 0, 1, 2, \dots$;

$P_n^m(\cos\theta)$ – присоединенные функции Лежандра 1-го рода степени n порядка m ;

$i_n(kr), n_n(kr)$ – сферические функции Бесселя и Неймана n -го порядка.

Первое условие сопряжения на поверхности $r = r_0$ полей областей I и II имеет вид:

$$\frac{1}{i\omega\rho_I} \frac{\partial p_I}{\partial r} = \frac{1}{i\omega\rho_{II}} \frac{\partial p_{II}}{\partial r}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad (3)$$

а второе условие сопряжения полей областей I и II (с учетом перехода к давлениям на указанной поверхности $r = r_0$) должно состоять из двух частей, первая из которых связывает давления в указанных частичных областях равенством:

$$p_I = p_{II}, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_0, \quad \theta_0 \leq \theta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi; \quad (4)$$

а вторая – внешнюю нагрузку оболочки p_{Σ} как:

$$p_{\Sigma} = p_{II}; \quad r = r_0$$

$$p_{II} = \sigma_{rr}, \quad \theta_0 \leq \theta \leq \theta_1, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi,$$

$$\frac{\partial W_r}{\partial t} = \frac{1}{i\omega\rho_{II}} \frac{\partial p_{II}}{\partial r}, \quad \theta_0 \leq \theta \leq \theta_1, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad (5)$$

где $\sigma_{rr} = f(\theta, \varphi)$ – нормальная составляющая механических напряжений, возникающих в оболочке при ее электрическом возбуждении;

W_r – нормальная составляющая радиальной компоненты вектора перемещений материальных частиц поверхности оболочки.

Таким образом, поле в области II представляет собой суперпозицию сферических волн, распространяющихся навстречу друг другу. Так, первое слагаемое в скобках второго уравнения системы (2) описывает волну, расходящуюся от источника, а второе – сходящуюся, которая возникает в результате взаимодействия расходящейся волны с переходной областью III, а также из-за переотражений от границ волновода в области III и от внешней границы области II. При этом звуковая энергия частично возвращается в область II, а частично притягивается в область III.

Область III – переходная, ее границы представлены в канонических системах координат, а поле в

ней (p_{III}), понимая, что волновод плоский, определяется совокупностью:

$$p_{III} = -i\omega\rho \left[\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n E_{nm}^{III} i_{\nu_m}(k_{nIII}R) + \times P_{\nu_m}(\cos\theta) + \right. \\ \left. + \sum_{n=0}^{\infty} F_n^{III} \cos(\zeta_{nIII}z_1) \exp(-i \gamma_{nIII}(x_1 - x)) \right], \quad (6)$$

где E_{nm}^{III}, F_n^{III} – неизвестные коэффициенты разложения;

ν_m – собственные числа, определяющие степень полинома Лежандра и определяемые из граничных условий:

$$\frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_{III}}{r \partial \theta} = 0 \quad \text{и} \quad \delta \theta = \pi, \quad R = R_0, \\ p_{III} = 0 \quad \text{и} \quad \delta \theta = 0, \quad R = R_0, \quad (7)$$

$$\frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_{III}}{\partial z} = 0 \quad \text{и} \quad \delta z = h_0, \quad x \in [0, x_1],$$

$$p_{III} = 0 \quad z = h_p, \quad x \in [0, x_1],$$

$k_{nIII}, \zeta_n, \gamma_n$ – величины, имеющие смысл волновых чисел и определяющие наличие или отсутствие неоднородных волн определенного типа в заданных граничных условиях на дне и поверхности.

Знак "минус" в экспоненциальном множителе четвертого слагаемого характеризует уменьшение амплитуды неоднородных волн к середине области.

Условия сопряжения областей II и III следующие (с учетом того, что задача – плоская):

$$\frac{\partial p_{II}}{\partial R} = \frac{\partial p_{III}}{\partial R}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad R = R_0, \quad (8)$$

$$p_{II} = p_{III}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad R = R_0.$$

Далее, поле в частичной области III обуславливает проникновение звука в область IV, которая и является волновым каналом. Известно [22], что распределение по сечению волновода "внешнего" (по отношению к области IV) звукового давления, которое соответствует моде какого либо номера, определяет в прилегающем к сечению волноводе (область IV) возникновение нормальной волны соответствующего номера (это касается и суперпозиции нормальных волн). Таким образом, рассмотренное поле p_{III} создает на границе $x = x_1$ указанное распределение "внешнего" давления.

Поле в области IV запишем как:

$$p_{IV} = -i\omega\rho \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{\infty} Q_n^{IV} \cos(\zeta_{nIV}z) \exp(i\zeta_{nIV}(x_1 - x_0)) + p_{oIV}, \quad (9)$$

где Q_{nm}^{IV} – неизвестный коэффициент разложения;

p_{oIV} – составляющая поля в волноводе, которая обусловлена наличием совокупности однород-

ных и неоднородных отраженных волн;

ζ_{nIV} , γ_{nIV} – величины, имеющие смысл волнового числа и определяющие наличие или отсутствие неоднородных волн в заданных граничных условиях на дне и поверхности.

Условия сопряжения областей III и IV следующие:

$$\frac{\partial p_{III}}{\partial R} = \frac{\partial p_{IV}}{\partial R}, \quad \theta = \theta_{01} \text{ è è è } \theta = \theta_{11}, \quad x = x_1, \quad (10)$$

$$p_{III} = p_{IV}, \quad \theta = \theta_{01} \text{ è è è } \theta = \theta_{11}, \quad x = x_1,$$

где углы $\theta = \theta_{01}$, $\theta = \theta_{11}$ могут быть найдены из геометрии задачи с учетом волновых условий приближения сферического фронта к плоскому.

В случае рассмотрения лишь задачи излучения, можно, накладывая условие отсутствия удаленных источников либо рассеивателей в рассматриваемой области канала, ограничиться выражениями (2) – (10). При этом составляющую поля в волноводе, которая обусловлена наличием совокупности однородных и неоднородных волн, отраженных от границы сопряжения $x = x_2$, можно не рассматривать.

В случае полной задачи передачи-приема сообщения, составляющая p_{oIV} должна быть учтена. При этом она имеет вид:

$$p_{oIV} = -i\omega\rho \sum_{n=0}^{\infty} S_{nm}^{IV} \cos(\zeta_{nIV}z) \exp(-i\xi_n(x_1 - x_0)), \quad (11)$$

где S_{nm}^{IV} – неизвестный коэффициент разложения;

ξ_{nIV} – величина, имеющая смысл волнового числа.

Знак "минус" при экспоненциальном члене выражения (11) выбран для уменьшения амплитуды неоднородных волн в середину области IV.

Далее, переходя к областям V, VI, VII, мы должны записать поля с помощью соответствующих представлений (2) – (11), а также с учетом использования локальных систем координат $X_2O_2Z_2$ и $R_2\varphi_2Z_2$, введения новых соответствующих коэффициентов разложений и трактовки сферического фронта в области VII как сходящегося. Условия сопряжения и граничные условия при этом сохраняются с учетом привязки к новой локальной системе координат.

Безусловно, задача также требует дальнейшего развития и доопределения в части введения эффекта пространственного затухания, а также учета таких факторов как ограниченность сообщения по времени, волнение моря, неровности и свойства дна, возможность рассмотрения берегового клина и т.д.

Как видно, использование цилиндрического источника в виде короткой по высоте оболочки тре-

бует введения достаточного большого числа частичных областей, а условия представления полей приводят к широкому применению сферических координат. Это провоцирует переход к источнику (приемнику) канонических форм, использование которого позволило бы не только упростить постановку, но и сохранить свойства многомодовости.

Таким преобразователем является – сферический.

Сферический преобразователь

Традиционно, в большинстве волновых задач акустики [18, 19] предпочитают рассматривать лишь нулевую (пульсирующую) собственную форму колебаний сферы.

Действительно, полное электродирование сферического пьезокерамического преобразователя сводит его к источнику звука нулевого порядка. При приеме это сводит многомодовый характер колебаний сферы лишь к возможности фиксации на электрической стороне только центрально симметричного решения. При этом осесимметричные и неосесимметричные составляющие полного решения не используются.

В случае реализации многомодовости как при приеме, так и при излучении, сохраняя принципы создания полей в частичных областях, можно упростить постановку, заменив цилиндр сферой конечных геометрических размеров (рис. 3).

При этом сферический преобразователь представляется сферической электроупругой тонкостенной оболочкой, с определенным электродированием. Опираясь на результаты работ [8, 23, 24], можно предполагать, что различные способы электродирования обеспечат электромеханическую активацию желаемой модовой структуры преобразователей, которая будет наиболее удобна, применительно к имеющимся условиям мелкого моря и режима связи.

Очевидно, упрощение касается исключения частичных областей I и VII. При этом полагаем, что сферические преобразователи вакуумированы внутри.

Границы областей при этом могут быть определены как:

$$\text{Область I: } r_0 \leq r \leq R_0, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

$$\text{Область II: } x_0 \leq r \leq \sqrt{x^2 + z^2} = x_0^2, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \\ z \leq H, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

$$\text{Область III: } x_1 \leq x \leq x_2, \quad z \leq H, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Далее, как и в предыдущем случае, области IV, и V аналогичны областям I, II.

Тогда выражения для полей p_I , p_{II} , p_{III} в соответствующих областях и для обозначений рис. 3 можно записать:

$$p_I = -i\omega\rho \times \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} B_{nm} P_n^m(\cos\theta) \cos(m\varphi) \times (C_n i_n(kr) + D_n n_n(kr)); \quad (12)$$

$$p_{II} = -i\omega\rho \times \left[\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n E_{nm}^{III} i_{v_m}(k_n R) \cdot P_{\gamma_m}(\cos\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} F_n^{III} \cos(\zeta_{nIII} z_1) \exp(-i \gamma_{nIII} (x_1 - x)) \right]; \quad (13)$$

$$p_{IV} = -i\omega\rho \times \left[\sum_{n=0}^{\infty} Q_n^{IV} \cos(\zeta_{nIV} z) \exp(i \xi_{nIV} (x_1 - x)) - \sum_{n=0}^{\infty} S_n^{IV} \cos(\zeta_{nIV} z) \exp(-i \xi_{nIV} (x_1 - x)) \right]. \quad (14)$$

Условия рассмотрения либо режима приема, либо режима передачи, либо полной задачи связи, как и для случая цилиндрического преобразователя, предполагают исключение из рассмотрения соответствующих членов уравнений (11) – (14).

Имеется одно общее замечание практического характера.

Оно связано с возможностью представления сферической волны источника в области сопряжения в виде плоской.

Так, опираясь на [25], можно считать, что сферический фронт, падающий на плоскую поверхность, будет иметь малую неравномерность (менее 1 дБ) и практически будет совпадать по форме с плоским при выполнении условия:

$$x \geq 10D, \quad (15)$$

где D – наибольший размер источника.

При этом известная [20] зависимость амплитуды сферической волн от расстояния сохраняется.

Кроме того, сферический фронт можно считать условно плоским – в зоне Фраунгофера, при выполнении неравенства

$$r_{\theta} \geq \frac{2D^2}{\lambda}.$$

При расположении источника, как показано на рис. 2, 3, нижней частоте сообщения 500 Гц, наибольшем габарите антенны $D = 1$ м в условиях изоскоростного гидрологического разреза – граница дальнего поля составит ≈ 0.7 м, а при коррекции результата условием (15) – 10 м.

Глубина моря при этом должна быть не менее 20 м.

Таким образом, в указанных условиях работы использование направленных свойств реального источника позволяет определить углы

$$\theta = \theta_{01}, \quad \theta = \theta_{11},$$

дополнив условия сопряжения.

Выводы

Представленные соображения определяют один из возможных подходов к формулировке, постановке и определению основных направлений решения задачи формирования звуковых полей в условиях мелкого моря с учетом связанности акустических, механических и электрических полей в забортовых оконечных устройствах приемо-передающих трактов средств звукоподводной связи, которые выполнены в виде многомодовых колебательных систем с распределенными параметрами.

При этом в качестве многомодовых систем предложены:

- цилиндр конечной длины с частично электродированной поверхностью, приведенный к тонкостенной круговой цилиндрической пьезокерамической оболочке;
- сфера с частично электродированной поверхностью, приведенная к тонкостенной круговой сферической пьезокерамической оболочке.

Список литературы

1. Ластовенко О.Р. Моделирование передаточных и импульсных характеристик гидроакустических волноводов. Волновод с абсолютно отражающими границами / О.Р. Ластовенко, В.А. Лисютин, Л.А. Ярошенко // Акустичний вісник. – 2007. – Т.10, №4. – С. 59-69.
2. Ластовенко О.Р. Применение импульсных характеристик для моделирования распространения импульсных сигналов в волноводах мелкого моря / О.Р. Ластовенко, В.А. Лисютин, Л.А. Ярошенко // Акустичний симпозиум “Консонанс-2009”: збірник праць. – К.: Інститут гідромеханіки НАН України. – 2010. – С. 230-235.
3. Абросимов Д.И. Особенности пространственной интерференционной структуры акустического поля в мелком море / Д.И. Абросимов, Ю.В. Петухов // Акустичний журнал. – 2000. – Т.46, №1. – С. 5-12.
4. Дивизинюк М.М. Акустические поля Черного моря / М.М. Дивизинюк. – Севастополь: НДЦ “Державний океанаріум” МО України та НАН України, 1998. – 351 с.
5. Богушевич Б.К. Возможности дальней акустической связи в ПЗК глубоководных районов Черного моря в условиях пространственной и сезонной изменчивости профиля скорости звука / Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа // Акустичний симпозиум “Консонанс-2005”: збірник праць. – К.: Інститут гідромеханіки НАН України. – 2005. – С. 78-83.
6. Leurer K.I. Acoustics of marine sediment under compaction: Binary grain-size model and viscoelastic extension of Biot's theory / Klans C. Leurer, Colin Brawn // J. Acoust. Soc. Am. – 2008. – Vol. 123, №4. – P. 1491-1951.
7. Гринченко В.Т. Механика связанных полей в элементах конструкций / В.Т. Гринченко, А.Ф. Улитко, Н.А. Шульга. – К.: Наукова думка, 1989. – Т.5. Электростатическая упругость. – 280 с.
8. Петрищев О.Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов Часть 1. Гармонические колебания пьезоэлектрических элементов в вакууме и метод резонанса-антирезонанса / О.Н. Петрищев. – К.: “АВЕРС”, 2012. – 299 с.

9. Савин В.Г. Преобразование акустических импульсов в электрические сферической пьезокерамической оболочкой / В.Г. Савин, И.О.Моргун // Электроника и связь. – 2006, № 6. – С. 36-42.

10. Андрущенко В.О. Експериментальне вивчення ефективності перетворення енергії на резонансних коливаннях п'єзокерамічного стержня з розрізними електродами при керованому електричному збудженні / В.О. Андрущенко, О.В. Борисейко, Д.С. Немченко, І.А. Улитко // Акустичний симпозиум "Консонанс-2009": збірник праць. – К.: Інститут гідромеханіки НАН України. [Електронний ресурс] / – Режим доступу до ресурсу: <http://www.hydromech.kiev.ua/rus/WWW-CONS/2009/cons2009-038-043.pdf>.

11. Коржик А.В. Об особенностях электромеханических преобразований в приемных пьезокерамических преобразователях с разрезными электродами / А.В. Коржик // Электроника и связь. – 2010. – №2. – С. 224-230.

12. Коржик О.В. Формування характеристик напрямленості одиночного приймального електропружного циліндричного перетворювача з розрізними електродами / О.В. Коржик, О.Г. Лейко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2005. – №1. – С. 50-55.

13. Моргун И.О. Действие плоской нестационарной волны давления на сферический пьезокерамический преобразователь с внутренним экраном / И.О. Моргун // Электроника и связь. – 2007. – № 1. – С. 62-69.

14. Кацнельсон Б.Г. Акустика мелкого моря / Б.Г. Кацнельсон, В.Г. Петухов. – М.: Наука, 1997. – 191 с.

15. Атлас океанов (Атлантический и Индийский океаны). – М.: МО СССР (ВМФ), 1977. – 306 с.

16. Pekeris C.L. Theory of propagation explosive sound in shallow water/ C.L. Pekeris // J. Acoust. Soc. Am. – 1948. – Vol. 27. – P. 1-117.

17. Карновский М.И. Модельное представление шумового поля в клине / М.И. Карновский // Акустический журнал. – 1978. – Т. VI, №24. – С. 867-872.

18. Гутин Л.Я. Избранные труды / Л.Я. Гутин. – Л.: Судостроение, 1977. – 597 с.

19. Сташкевич А.П. Акустика моря / А.П. Сташкевич. – Л.: Судостроение. 1966. – 353 с.

20. Гринченко В.Т. Основы акустики / В.Т. Гринченко, І.В. Вовк, В.Т. Маціпура. – К.: Наукова думка, 2007. – 640 с.

21. Гринченко В.Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках / В.Т. Гринченко, І.В. Вовк. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.

22. Исакович М.А. Общая акустика / М.А. Исакович. – М.: Наука, 1973. – 495 с.

23. Коржик О.В. Врахування типу електродування сферичного електропружного перетворювача в наскрізних задачах прийому звуку багатомодовими системами / О.В. Коржик // Електроніка і зв'язок. – 2013. – №1. – С. 76-88.

24. Коржик О.В. До визначення граничних умов в постановках задач прийому звуку сферичним електропружним перетворювачем з розрізними електродами / О.В. Коржик // Електроніка і зв'язок. – 2013. – №2. – С. 97-103.

25. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения / Р. Дж. Боббер. – М.: Мир, 1974. – 359 с.

Поступила в редколлегию 31.07.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Г. Лейко, Государственное предприятие "Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов", Киев.

БАГАТОМОДОВІ СИСТЕМИ В ЗАДАЧАХ ЗВУКОПІДВОДНОГО ЗВ'ЯЗКУ

В.С. Дідковський, О.В. Коржик

В роботі запропоновано один з можливих підходів до формулювання, постановки та розв'язку задачі формування звукових полів в мілкому морі з врахуванням багатомодовості та багатозв'язаності основних фізичних полів передавальних та приймальних пристроїв абонентів звукопідводного зв'язку. Передбачається, що пристрої виконано з п'єзокерамічних перетворюючих елементів, які представлені коливальними системами з розподіленими параметрами з різними видами електродування. Постановка передбачає застосування методу часткових областей для структурування робочого простору задачі, описання нормальних хвиль в хвилеводному каналі з комбінованими границями шляхом розв'язку задачі Штурма-Ліувілля, використання критеріїв ближніх та дальніх полів та умов мілкого моря, а також заміну граничних умов на поверхнях перетворювачів – умовами спряження.

Ключові слова: звукопідводний зв'язок, мілке море, багатомодові перетворюючі системи, наскрізна задача, сферична оболонка, циліндрична оболонка, умови спряження.

MULTI-MODE SYSTEMS IN PROBLEMS OF UNDERWATER COMMUNICATIONS

V.S. Didkovsky, O.V. Korzyk

In a paper is proposed some approach to the formulating, founding and solving the problem of forming sound fields in shallow water in the case of multimodality and multicoupleness of main physical fields in piezoelectric transducers of underwater communication subscribers. The problem formulation involves the method of partial areas for determination of workspace structure, the normal waves description in a sound waveguide channel with combined boundary conditions by means of Sturm-Liouville problem solution, using criterions of near and far sound fields and conditions of shallow sea. The boundary conditions on the transducer surface were replaced with the interface conditions in accordance with principles of "through task".

Keywords: underwater sound communication, shallow sea, multi-mode systems, "through task", spherical shell, cylindrical shell, boundary conditions, interface conditions.