

УДК 534.7

С.В. Хрхрян, В.К. Яценко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ ФРЕНЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДАТЧИКОВ УЗИ

При широком распространении ультразвуковых (УЗИ) исследований в медицинской практике проблема полноты и достоверности получаемой информации ультразвуковыми приборами остается открытой. Практика показывает, что только применение фантомов при проверке приборов не дает полной гарантии полноты диагностической информации. Работа датчиков УЗИ происходит в условиях, когда медицинская информация получается не только из дальнего поля излучения (зоны Фраунгофера), но и из ближнего поля – Френеля. Особенности этих областей поля по-разному влияют на конечный результат. Работа посвящена восполнению, на уровне моделирования, пробелов в исследовании свойств пограничной области излученного поля для целей разработки датчиков УЗИ и контроля их качества в процессе эксплуатации.

Плоские волны; зона Френеля; зона Фраунгофера; ультразвук; медицина.

S.V. Khrkhyran, V.K. Yatsenko

ZONE FRESNEL MODELLING FOR INFORMATION PROPERTY TEST OF ULTRASONIC MEDICAL SENSORS

The problem of completeness and reliability of received information ultrasonic devices remains open, at a wide circulation of ultrasonic researches in medical practice. Practice shows that only the phantom when checking the devices does not give a full guarantee of the completeness of diagnostic information. Work sensors, ultrasound examination takes place in the conditions, where medical information is obtained not only from the far-field radiation zone (Fraunhofer), but also from the middle of the field - Fresnel zone. The special characteristics of these areas of the field on the opposite effect on the final result. Work is devoted to completion of gaps in research of properties of a boundary region of the radiated field for development of the ultrasonography sensors at level of modeling and control of their quality in use.

Plane wave; Fresnel zone; Fraunhofer zone; ultrasonic; medicine.

Ультразвуковые исследования (УЗИ) широко используются при медицинской диагностике почти на всех уровнях предоставления медицинских услуг. В комплексе ультразвукового диагностического оборудования наиболее уязвимыми по критерию износа являются ультразвуковые датчики и их согласующее, фокусирующее покрытие (протектор), контактирующее с пациентом, гелем, дезинфицирующими и стерилизующими жидкостями и т.д. Механические повреждения, химические и, возможно, тепловые воздействия приводят к нарушению акустических параметров элементов конструкции датчиков. Проверка ультразвуковых приборов с применением фантомов широко применяется в современной мировой практике, внедряется в отечественной системе медицинской метрологии. Она не всегда дает однозначные результаты даже на новой аппаратуре и часто не является убедительной для врачей.

Альтернативой в сложившейся ситуации является применение количественных методов, которые в настоящее время не разработаны до уровня применения в медицинской практике.

В представленной работе мы приводим результаты по разработке и анализу модели поля плоского гауссова излучателя и полосового излучателя в жестком экране. В теле излучателя реализуется условие плоской деформации, это приближение сводит поставленную задачу к двумерной.

Расчетная (вычислительная) математическая модель строится на основе конструирования точного решения уравнения Гельмгольца для акустического потенциала излучения в однородную невязкую среду.

В данном приближении задача ставится следующим образом.

Рассматривается гармонический во времени закон изменения акустического потенциала Φ во времени:

$$\Phi(x, z, t) = \varphi(x, z) \cdot e^{i\omega t}.$$

Введем декартову систему координат, рис. 1.

Уравнение Гельмгольца принимает вид

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + k^2 \varphi = 0, \tag{1}$$

где k – волновой вектор; $p(x, z) = i\omega\rho \cdot \varphi(x, z)$ – акустическое давление в среде, вектор скорости в акустической волне есть

$$\vec{v}(x, z) = v_x \vec{i} + v_z \vec{j},$$

где \vec{i}, \vec{j} – единичные вектора, направлены вдоль координатных осей x и z .

$$v_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \tag{2}$$

$$v_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

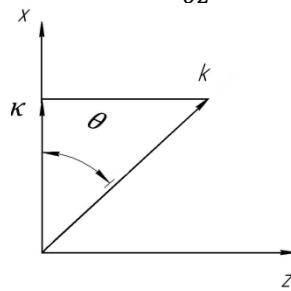


Рис. 1. Акустическая волна излучается в полупространство $z > 0$

Поверхность $z=0$ частью своей излучает в это полупространство. Вне области излучения поверхность абсолютно жесткая. Ось u направлена перпендикулярно плоскости рисунка, навстречу читателю.

Решение представим в виде непрерывного набора плоских волн

$$\varphi(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha(\kappa) e^{i\kappa x} e^{i\sqrt{k^2 - \kappa^2} \cdot z} d\kappa, \tag{3}$$

$\alpha(\kappa)$ – спектральная плотность распределения скорости $v_z(x)|_{z=0}$ или смещения $w(x)|_{z=0} = w_0(x)$ на границе полупространства $z > 0$ (рис. 1), определяется из граничного условия

$$v_z(x, 0) = -\left. \frac{\partial \varphi(x, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = i\omega w_0(x), \tag{4}$$

которое приводит к интегральному уравнению относительно $\alpha(\kappa)$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{k^2 - \kappa^2} \cdot \alpha(\kappa) \cdot e^{i\kappa x} \cdot d\kappa = -\omega w_0(x). \tag{5}$$

Подставляя $\alpha(\kappa)$ из (5) в (3), получаем решение, аналогичное (5.10) работы [2].

Исследуем поле от излучателей двух типов.

Первый – плоскость с гауссовым распределением амплитуды смещения в направлении оси x .

Второй – полоса, бесконечная вдоль оси u шириной D с единичной амплитудой.

Функции распределения амплитуд для этих случаев приведены на рис. 1. Для распределения Гаусса, рис. 2, потенциал выражается формулой:

$$\varphi(x, z) = \sqrt{2\pi} \cdot |c|w_0 D \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{\pi s^2 D^2}{2}\right) \cdot \frac{\exp[2\pi i(sx + \sqrt{1-s^2} z)]}{\sqrt{1-s^2}} ds$$

где c – скорость звука в среде,

$$D = \frac{\sigma}{\lambda}$$

w_0 – амплитуда смещения поверхности излучателя.

λ – длина волны в среде, σ – дисперсия гауссова распределения:

$$w(x) = e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}$$

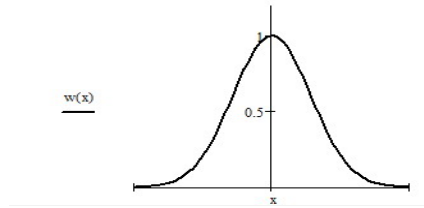


Рис. 2. График распределения Гаусса. График имеет ширину равную σ по уровню 0,8 и 2σ по уровню 0,3

Для прямоугольного распределения, рис. 3, потенциал выражается формулой

$$\varphi(x, z) = \sqrt{2} \cdot |c|w_0 D \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi Ds)}{(\pi Ds)} \cdot \frac{\exp[2\pi i(sx + \sqrt{1-s^2} z)]}{\sqrt{1-s^2}} ds,$$

где D – ширина прямоугольной полосы, нормированная на длину волны, а

$$s = \frac{k}{k}$$

и $s = \cos \theta$ – косинус угла скольжения волны рис. 1 [1].

Сформулировав точные решения поставленной задачи (1–5), проведем численный эксперимент по исследованию свойств скалярного поля потенциала φ и векторного поля скоростей (2). Одной из важных целей настоящей работы является определение областей поля, где волна является плоской, или квазиплоской [1]. Критерием здесь является малость поперечной, x -составляющей скорости, по сравнению с z -составляющей,

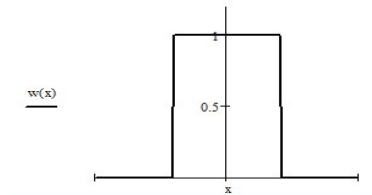


Рис. 3. Прямоугольное распределение смещения по поверхности полосы, вертикально – координата z , горизонтально – x

Гауссово распределение смещения границы $z=0$. Лучевая картина потенциала представлена на рис. 4.

Луч в сечениях $z=\text{const}$ представляет гауссово распределение с постепенно увеличивающейся дисперсией. В области 0–10 миллиметров не наблюдается неоднородностей поля, характерных для зоны Френеля, что дает возможность применять этот метод запитки излучателей для снижения мертвой зоны и получения информации с малых расстояний.

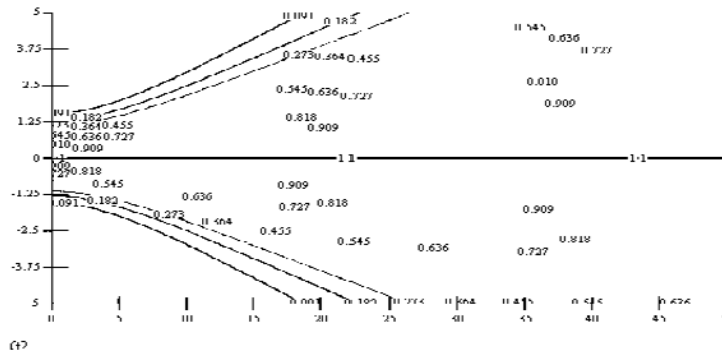


Рис. 4. Форма акустического пучка скалярного потенциала при гауссовом распределении амплитуды колебаний для длины волны 0,5 мм. По оси абсцисс – глубина поля в миллиметрах. Для $D=5\lambda$ по оси ординат расстояние в миллиметрах. Уровни равной амплитуды нормированы на амплитуду на оси луча (типовой режим автоматической временной регулировки усиления)

На рис. 5 приводится картина векторного поля скоростей для данного случая. Видно, что x – компонента поля намного (в 3 и более раз) меньше компоненты, нормальной к границе полупространства. Волна действительно является квазиплоской.

Излучение полосой, совершающей поршневые колебания. Лучевая картина потенциала показана на рис. 6. Векторное поле на рис. 7. Сравнение данных для гауссова и полосового распределения показывают, что первое обеспечивает равномерное излучение без явно выраженной интерференционной картины. При поршневом излучении интерференционная картина заметно будет искажать информацию об объектах в слое до 5 мм.

Излучение от обоих источников можно рассматривать как квазиплоское даже при апертуре излучающей поверхности 5 длин волн, или 2,5 мм. Увеличение апертуры ведет к формированию практически параллельных лучей в достаточно протяженной области, с поперечным размером, соответствующим апертуре излучателя.

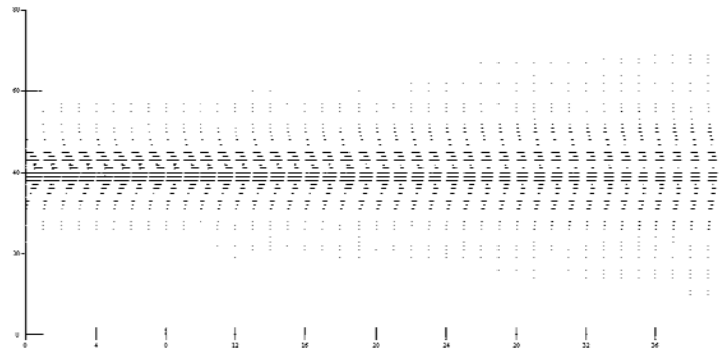


Рис. 5. Векторное поле акустических скоростей для гауссова излучателя, рис. 2 и 4. По оси абсцисс единица соответствует $\frac{1}{2}$ длины волны, по оси ординат – $\frac{1}{4}$ длины волны

Полученные результаты коррелируют с расчетами по другим, приближенным методам [3]. Они подтверждают возможность работы эхолокационных приборов в зоне Френеля и применения методов пространственной обработки сигналов, применяемых в когерентной оптике [4].

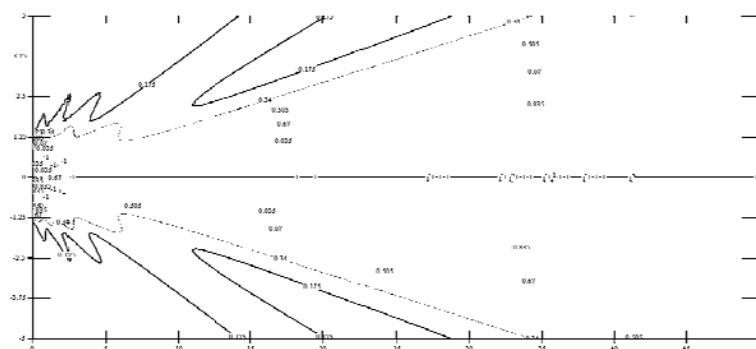


Рис. 6. Форма акустического пучка скалярного потенциала при поршневом распределении амплитуды колебаний, рис. 3. Параметры графика те же, что и на рис. 4

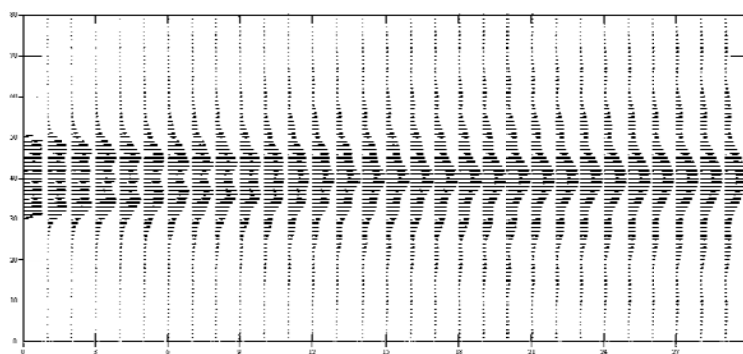


Рис. 7. Векторное поле акустических скоростей для полосы, рис. 3. По оси абсцисс единица соответствует $\frac{1}{2}$ длины волны, по оси ординат – $\frac{1}{4}$ длины волны

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Исакович М.А. Общая акустика. – М: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973.
2. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1972. – 352 с.
3. Бахвалов Н.С., Жилейкин Я.М., Заболоцкая Е.А. Нелинейная теория звуковых пучков. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. (Современные проблемы физики). – 176 с.
4. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 264 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор В.И. Снежков.

Хрхрян Сергей Викторович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ba313@ Rambler.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5; тел.: 88632975329; физический факультет; кафедра биофизики и биокibernетики; аспирант.

Яценко Владимир Константинович – e-mail: vlayacenko@yandex.ru; физический факультет; кафедра биофизики и биокibernетики; к.ф.-м.н.; доцент.

Khrkhryan Sergey Viktorovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ba313@ Rambler.ru; 5, Zorge, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +78632975329; physical department; the department of biophysics and biological cybernetics; postgraduate student.

Yatsenko Vladimir Konstantinovich – e-mail: vlayacenko@yandex.ru; physical department; the department of biophysics and biological cybernetics; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.