

УДК 534.141

ОЦЕНКА РАЗМЕРА СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Д.В. ЛЕОНОВ¹, Т.В. ЯКОВЛЕВА^{1,2}, Н.С. КУЛЬБЕРГ³, О.В. ВЛАСОВА¹,
О.В. ОМЕЛЯНСКАЯ¹, Ю.А. ВАСИЛЬЕВ¹

¹Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы
«Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий
Департамента здравоохранения города Москвы»
(г. Москва, Россия)

²Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии наук»
(г. Москва, Россия)

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(г. Москва, Россия)

Аннотация. В данной статье представлен подход к определению размеров структурных образований в ультразвуковой диагностике, основывающийся на теоретически обоснованном анализе статистических характеристик ультразвукового сигнала, рассеянного на неоднородностях исследуемой среды. В зависимости от соотношения размеров области когерентности и ширины луча, статистическое распределение данных, формирующих ультразвуковое изображение, может варьироваться между распределениями Рэлея и Райса. Настоящая работа направлена на разработку нового метода статистического анализа, который позволит эффективно выделять значительную когерентную составляющую в эхо-сигнале, служа инструментом для оценки размеров неоднородностей среды. Такой подход к анализу ультразвуковых изображений обеспечит возможность количественного оценивания структурных образований, что в свою очередь повысит информативность ультразвуковой диагностики.

Ключевые слова: дифференциация тканей, рассеяние, распределение Рэлея, распределение Райса, диагностическая визуализация, количественный ультразвук.

SIZE OF STRUCTURAL ELEMENTS ESTIMATION IN ULTRASONIC VISUALIZATION USING STATISTICAL ANALYSIS

D.V LEONOV¹, T.V. YAKOVLEVA, N.S. KULBERG, O.V. VLASOVA, O.V. OMELIANSKAYA,
YU. A. VASILEV

¹Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the
Moscow Health Care Department
(Moscow, Russia)

²Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russia)

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State
Technical University (National Research University)»
(Moscow, Russia)

Abstract. This paper presents an approach to determining the size of structural formations in ultrasound diagnostics, based on theoretically justified analysis of the statistical characteristics of the ultrasound signal scattered on inhomogeneities of the investigated area. Depending on the ratio between the size of the coherence region and the beam width, the statistical distribution of the data forming the ultrasound image can vary between Rayleigh and Rice distributions. The present work aims to develop a new statistical analysis method that can effectively isolate the significant coherence component in the echo signal, serving as a tool for estimating the

size of inhomogeneities in the area. This approach to the analysis of ultrasound images will provide the possibility of quantitative assessment of structural formations, which in turn will increase the quality of ultrasound diagnostics.

Keywords: tissue differentiation, scattering, Rayleigh distribution, Rice distribution, diagnostic imaging, quantitative ultrasound.

Введение

Методы статистической обработки сигналов сегодня активно применяются в различных научных областях для анализа стохастических данных. Особое внимание уделяется характеру статистического распределения, который влияет на анализируемую информацию. В контексте ультразвуковой визуализации данных, рассматриваемых в данной работе, адекватным является распределение Райса [1]. Это распределение, а также его частный случай – распределение Рэлея – описывают амплитуду изображения в В-mode при однородных отражателях и высокой их плотности, формируя огибающую радиочастотного сигнала [2]. В отсутствие когерентной составляющей сигнал следует распределению Рэлея, тогда как распределение Райса наблюдается при наличии заметной когерентной составляющей [3]. Это распределение активно используется для повышения качества сонограмм, в том числе для снижения шума. Хотя связь рэлеевского и райсовского распределений с рассеянными ультразвуковыми сигналами подтверждена многими исследователями, новое применение заключается в количественной оценке размеров неоднородностей через выявление когерентной составляющей [4, 5]. Таким образом, работа предлагает подход к анализу статистических характеристик эхо-сигналов, позволяющих проводить оценку размеров структурных элементов, формирующих ультразвуковое изображение.

Материалы и методы

Оценивание неоднородностей среды с помощью ультразвуковой визуализации происходило на основе отношения степени когерентности рассеянного ультразвукового сигнала и соотношения геометрических параметров ультразвукового луча и рассеивающих неоднородностей. При уменьшении количества некоррелированных между собой рассеивателей распределение Рэлея переходит в распределение Райса. При обнаружении момента перехода одного распределения в другое можно говорить об оценке размера структурных неоднородностей.

В данном исследовании анализируется когерентность эхо-сигнала, полученного в биологической среде с однородными рассеивателями, что позволяет формировать ультразвуковое диагностическое изображение, соответствующее рэлеевскому и райсовскому статистическим распределениям амплитуды.

Распространение ультразвуковой волны в среде описывается основным уравнением акустики, которое имеет конкретное решение, зависящее от свойств рассеивающей неоднородной среды, в частности, от флуктуаций плотности и сжимаемости; в контексте Фурье-преобразования $P(\vec{R}, \omega)$ пространственно-временной функции давления $p(\vec{R}, t)$, это уравнение записывается следующим образом [6]:

$$\Delta P + \frac{\omega^2}{c^2} P + 2i\gamma(\omega, \vec{R})P = \frac{\omega^2}{c^2} \hat{\beta}(\vec{R})P + \nabla(\hat{\rho}(\vec{R}))\nabla P, \quad (1)$$

где ω – частота, t – время, $c = (\rho_0 \beta_0)^{-1/2}$ – скорость звука в среде с плотностью ρ_0 и сжимаемостью β_0 , $\frac{\rho(\vec{R})}{\rho_0}$ – относительное изменение плотности, $\frac{\beta(\vec{R})}{\beta_0}$ – относительное изменение сжимаемости среды, $\gamma(\omega, \vec{R})$ – преобразование Фурье функции поглощения звука в среде, \vec{R} – пространственная координата рассматриваемой точки среды. Как

правило, выше приведенное уравнение для спектральной плотности функции давления $P(\vec{R}, \omega)$ решается в борновском приближении.

Функция давления, описывающая распространение звука в среде, является комплексной величиной с амплитудой и фазой. В неоднородной среде рассеянный сигнал искажается спекл-шумом, который возникает из суммы многих независимых компонентов от рассеяния звуковых волн точечными отражателями с гауссовской статистикой. Итоговая функция давления и эхо-сигнал представляют собой сумму детерминированной величины и гауссовского шумового компонента, искажающего сигнал.

Рассмотрим комплексную величину функции давления $p(\vec{R}, t)$ в определенной точке пространства \vec{R} и времени t : $p(\vec{R}, t) = p_{\text{Re}} + ip_{\text{Im}}$ как случайную величину. Она состоит из детерминированной компоненты и гауссовского шума с дисперсией σ^2 . Обозначим амплитуду детерминированной части как A . Действительная p_{Re} и мнимая p_{Im} части комплексного сигнала искажаются независимым гауссовским шумом с одинаковыми дисперсиями и ненулевыми математическими ожиданиями. Амплитуда $p = \sqrt{p_{\text{Re}}^2 + p_{\text{Im}}^2}$ результирующего сигнала подчиняется распределению Райса с параметрами A и σ^2 . Функция плотности вероятности этого распределения определяется следующим образом [1]:

$$f(p|A, \sigma^2) = \frac{p}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{p^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{pA}{\sigma^2}\right). \quad (2)$$

Задача одновременного определения параметров сигнала A и шума σ на основе выборочных измерений $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ суммарного сигнала может быть эффективно решена с помощью методов двухпараметрического анализа данных [7-10]. Эти методы служат математическим инструментом для статистического анализа эхо-сигнала при решении проблемы оценки размеров неоднородности среды.

Результаты и их обсуждение

Для количественной оценки размеров рассеивателей при ультразвуковой визуализации в работе использовался математический подход. Он основан на анализе статистического распределения амплитуды эхо-сигнала и выявлении перехода от рэлеевского распределения к райсовскому. Это позволило определить диаметр фокальной перетяжки луча, который соответствует оцениваемому размеру рассеивающих ультразвуков неоднородностей исследуемой биологической среды. Полученная информация о размере рассеивателей важна для наблюдения за изменениями на клеточном уровне. Результаты анализа эхо-сигнала позволяют определить степень когерентности, где одна составляющая подчиняется Рэлеевскому распределению, а другая – Райсовскому. Анализ райсовских данных применим для решения задачи, так как возможно рассчитать составляющие сигнала и шума, исходя из конкретных измерений без дополнительных предположений.

Заключение

В работе представлена концепция, основанная на статистическом анализе эхо-сигнала, для определения размеров структурных образований при ультразвуковой визуализации. Разработанный математический метод демонстрирует свою эффективность в количественной ультразвуковой диагностике, что подтверждено экспериментальными результатами. Ключевым аспектом является переход распределения эхо-сигнала от Рэлеевского к Райсовскому, который связан с изменениями ширины луча. Исследования с использованием компьютерного моделирования подтвердили гипотезу о зависимости характера статистического распределения от размеров сканирующего луча и неоднородностей. Таким образом, предложенный метод может значительно улучшить задачи количественной ультразвуковой диагностики.

Список литературы

1. Rice S.O. Mathematical Analysis of Random Noise // Bell System Technical Journal. 1944. Vol. 23. P. 282-322.
2. Cai R. Statistical Characterization of the Medical Ultrasound Echo Signals // Scientific Reports. 2016. Vol. 6, No 1. P. 39379.
3. Parker K.J. Shapes and distributions of soft tissue scatterers // Physics in Medicine and Biology. 2019. Vol. 64, No 17. P. 175022.
4. Shankar P.M. A general statistical model for ultrasonic backscattering from tissues // IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control. 2000. Vol. 47, No 3. P.727-736. DOI: 10.1109/58.842062.
5. Martínez-Graullera O., Yagüe-Jiménez V., Romero M. P. and Ibáñez Rodríguez A. Improving ultrasonic medical image quality by attenuation of the secondary lobes // IEEE International Ultrasonics Symposium. 2019. P. 1286-1289. DOI: 10.1109/ULTSYM.2019.8926260.
6. Yakovleva T.V., Kulberg N.S. Noise and Signal Estimation in MRI: Two-Parametric Analysis of Rice-Distributed Data by Means of the Maximum Likelihood Approach // American Journal of Theoretical and Applied Statistics. 2013. Vol. 2, No. 3. P. 67-79.
7. Яковлева Т.В. Теоретическое обоснование математических методов совместного оценивания параметров сигнала и шума при анализе райсовских данных // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, № 3. С. 445-473. DOI: 10.20537/2076-7633-2016-8-3-445-473.
8. Яковлева Т.В., Кульберг Н.С. Методы математической статистики как инструмент двухпараметрического анализа магнитно-резонансного изображения // Информатика и ее применения. 2014. Т. 8, № 3. С. 79-89.
9. Yakovleva T. Peculiarities of the Rice Statistical Distribution: Mathematical Substantiation // Applied and Computational Mathematics. 2018. Vol. 7, No 4: P. 188-196. DOI: 10.11648/j.acm.20180704.12.
10. Яковлева Т.В., Кульберг Н.С., Леонов Д.В. Оценивание размера структурных образований при ультразвуковой визуализации посредством статистического анализа эхо-сигнала // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2023. Т. 509, № 0. С. 87-93. DOI: 10.31857/S2686954322600744.