

Николаев Сергей Васильевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: nik@atan.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371638; кафедра автоматизированных систем научных исследований и экспериментов; к.т.н.; доцент.

Nikolaev Sergey Vasilyevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: nik@atan.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371638; the department of automated research systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 534.222: 615.47: 681.883

А.П. Волощенко, А.Н. Куценко, А.А. Резниченко, Д.С. Слущкий

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ И БИМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Рассматриваются модели и характеристики акустических и биомедицинских процессов, полей и сигналов: теоретическое и экспериментальное исследование влияния неоднородных низкочастотных акустических волн на коэффициент прохождения через границу раздела вода/воздух; применение пространственной обработки сигналов с использованием многомерных спектральных функций для повышения чувствительности приема гидроакустической и биомедицинской аппаратуры; теоретическое и экспериментальное моделирование и практическое выявление фрактальной структуры кардиоинтервалограммы для оптимизации проведения терапевтической процедуры.

Неоднородная волна; коэффициент прохождения; граница раздела; корреляционный метод; пространственная обработка; многомерный спектр; кардиоинтервалограмма; спектр интервалов сердечбиения; фрактальный ряд.

A.P. Voloshchenko, A.N. Kutsenko, A.A. Reznichenko, D.S. Slutsky

THE RESEARCH OF ACOUSTIC AND BIOMEDICAL SIGNALS FEATURES FOR DIAGNOSTIC AND HYDROACOUSTIC EQUIPMENT CREATION

Models and features of acoustic and biomedical processes, fields and signals is consider: the theoretical and experimental investigation of the inhomogeneous waves influence on the transmission coefficient through the water-air interface; the signals spatial processing using with multivariate spectral functions for the hydroacoustic and biomedical devices receiving sensitivity increasing; the theoretical and experimental modeling and practical identification of fractal cardio interval gram structure for therapeutic procedure organization optimization .

Inhomogeneous waves; transmission coefficient; the interface; correlation method; spatial processing; multivariate spectrum; cardio interval gram; range of inter-beat intervals; fractal row.

Исследование аномальности прозрачности границы вода/воздух в диапазоне звуковых, низких и инфразвуковых частот может иметь большое значение в целом ряде геофизических, биологических и прикладных проблем, таких как гидролокация, профилирование грунта, исследование пузырьковых слоев, ультразвуковая интроскопия, кардиография. Низкая точность существующих методов пеленгации при малых отношениях сигнал/помеха требует разработки новых подходов к определению местоположения цели и ее характеристик. Экспериментальный анализ фрактальной характеристики кардиоинтервалограммы имеет большое значение при диагностике в период проведения терапевтической процедуры.

Исследование влияния неоднородных волн на коэффициент прохождения через границу вода/воздух. Согласно устоявшемуся мнению, коэффициент прохождения из воды в воздух незначителен и не зависит ни от частоты излучения источника, ни от глубины его расположения относительно границы раздела, ни от геометрических параметров самого излучателя, а определяется только соотношением акустических импедансов соприкасающихся сред [1]. Однако в ряде исследований [2] теоретически доказано, что, при определенных условиях, происходит значительное увеличение коэффициента прохождения из воды в воздух. Данный феномен связан с возрастающей ролью неоднородных волн в процессе прохождения через границу. Обычно, при расчетах, данной компонентой можно пренебречь, так как амплитуда возникающей неоднородной волны быстро затухает. Но на малых глубинах и низких частотах неоднородная волна может оказывать существенное влияние на образовавшуюся преломленную волну (рис. 1).

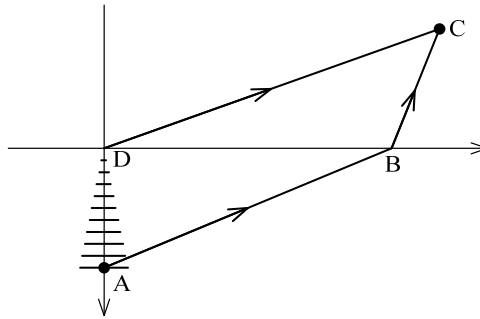


Рис. 1. Два пути, которыми волна попадает от излучателя А к приемнику С. Путь АВС соответствует однородной волне, которая распространяется по законам геометрической оптики. Путь ADC показывает расстояние, пройденное неоднородной волной

Для проверки существования эффекта аномальной прозрачности и оценки достоверности математических расчетов в работах А.О. Година и Л.М. Бреховских была проведена серия экспериментов по измерению коэффициентов прохождения через границу раздела вода-воздух [4]. Исследования проводились в заглушенном гидроакустическом бассейне.

Экспериментальные результаты качественно совпадают с теоретическими [2]. Влияние неоднородных волн приводит к увеличению прозрачности границы раздела вода-воздух на низких частотах при расположении точечного источника на расстояниях меньших длины волны от границы.

Применение пространственной обработки сигналов для повышения чувствительности приема. В современных гидроакустических локационных системах для определения направления прихода сигнала используются методы, требующие настройки на цель по амплитудным или фазовым характеристикам принятого сигнала. Корреляционный же метод определения местоположения источника требует наличия системы приемников и использования сложных сигналов [4]. Но, несмотря на принцип определения пеленга на цель в том или ином методе, их основой является временная обработка сигналов. Тогда как использование пространственно-временной обработки сигналов может дать лучший результат [5].

В общем случае при решении задач обнаружения и обработки гидроакустических сигналов поле звукового давления принято рассматривать как случайное пространственно-временное поле. Аргументами функции такого поля являются время t

и координаты точки наблюдения x, y, z в декартовой системе координат. В рамках корреляционной теории поле описывается двумя моментами – средним и пространственно-временной корреляционной функцией. В общем случае пространственно-временная корреляционная функция зависит от восьми переменных. Но при рассмотрении поля как стационарного по времени и однородного по пространству пространственно-временная корреляционная функция зависит только от разности моментов времени $\tau = t_2 - t_1$ и от разности координат точек наблюдения $\vec{\rho} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$.

Дальнейшим упрощением статистически однородного поля является изотропное поле, для которого пространственно-временная корреляционная функция зависит лишь от модуля вектора $\vec{\rho}$, в отличие от анизотропного поля, для которого корреляционная функция зависит не только от модуля, но и от направления вектора $\vec{\rho}$.

С учетом вышеуказанных допущений общее уравнение, описывающее распространение волны в пространственно-временной области, имеет вид

$$A(t) = A_0 \cdot \frac{1}{r^n} \cdot \exp \left[-i(\omega \cdot t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_0) \right]. \quad (1)$$

В этом уравнении первое слагаемое по знаку экспоненты описывает распространение волны во временной области, второе – в пространственной. Второе слагаемое обычно отбрасывают и рассматривают волновой процесс только во временной области. Для рассмотрения сигнала в пространственной области необходимо отбросить первое слагаемое, другими словами – рассмотреть сигнал в определенный момент времени.

Для анализа волнового процесса в пространственной области используем теорему Винера–Хинчина, которая устанавливает взаимосвязь пространственных корреляционных функций случайного поля и пространственно-частотного спектра мощности этого поля. Для пространственного случайного процесса математическое выражение теоремы Винера–Хинчина имеет вид

$$K(\Delta x, \Delta y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(f_x, f_y) e^{i2\pi(f_x \Delta x + f_y \Delta y)} df_x df_y, \quad (2)$$

где $K(\Delta x, \Delta y)$ – пространственная корреляционная функция; $G(f_x, f_y)$ – пространственный спектр мощности поля; f_x, f_y – пространственные частоты поля в некоторой плоскости (x, y) .

Обратное преобразование представляет собой выражение для биспектра, т.е. преобразования Фурье корреляционной функции третьего порядка. Его можно представить в виде

$$G(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(\Delta x, \Delta y) e^{i\omega(k_x \Delta x + k_y \Delta y)} d\Delta x d\Delta y, \quad (3)$$

где k_x, k_y – проекции волнового вектора на соответствующие оси.

Для рассмотрения поля в пространстве необходимо учитывать проекцию волнового вектора на третью ось – k_z , но ее можно вычислить, зная величину k и вычислив k_x, k_y .

Для того чтобы определить расположение волнового вектора в пространстве относительно системы координат, привязанной к приемной антенне, необходимо знать проекции волнового вектора на оси координат (рис. 2). Для этого можно использовать две линейные антенные решетки, расположенные вдоль осей координат. В каждый момент времени каждая линейная антенная решетка принимает

проекцию волнового фронта на соответствующую ось. Путем отдельной обработки сигнала от каждого элемента антенны можно восстановить проекцию волнового фронта на ось координат.

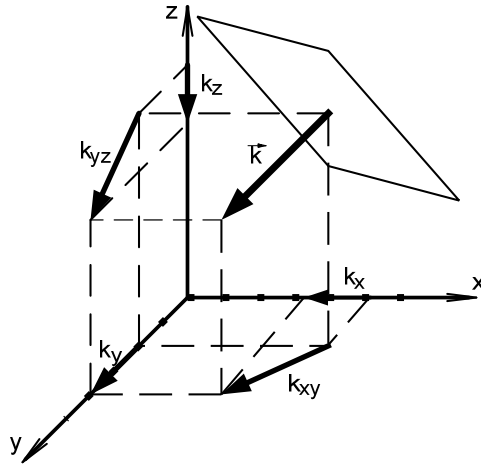


Рис. 2. Проецирование волнового вектора на систему координат

Такая обработка сигнала даст дискретные проекции на оси координат. Точность восстановления проекции сигнала на ось зависит от количества приемников и от расстояния между приемниками. Из определенных проекций сигналов на оси координат путем вычисления двумерной взаимной корреляционной функции и ее преобразования Фурье получим биспектр, имеющий максимум в точке, координаты которой соответствуют значениям проекций волнового вектора на оси координат (рис. 3).

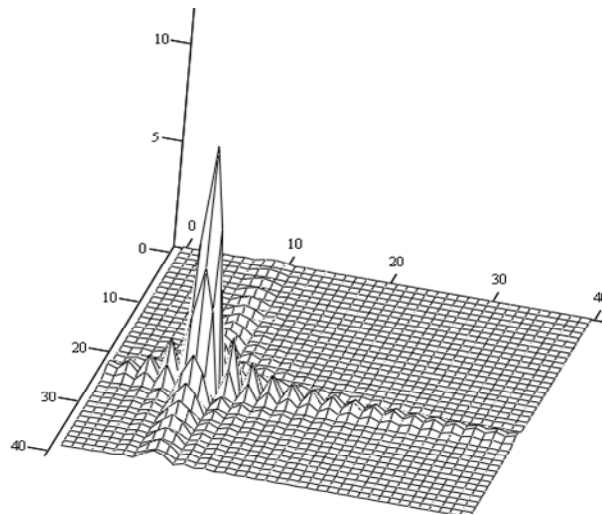


Рис. 3. Биспектр

Двумерная корреляционная функция и биспектр по сравнению с обычными корреляционными функциями и энергетическим спектром обладают несколькими преимуществами.

Во-первых, двумерная корреляционная функция позволяет сохранить комплексный Фурье спектр, и, следовательно, восстановить информацию о фазовых характеристиках исходного сигнала.

Во-вторых, биспектр гауссова шума равен нулю, что повышает помехоустойчивость метода.

В-третьих, биспектр инвариантен к смещению исходного сигнала.

К тому же, вычисление дискретных двумерной корреляционной функции и биспектра позволит сильно сократить затраты машинного времени по сравнению с вычислением интегральных двумерной корреляционной функции и интегрального биспектра и проводить обработку сигналов в реальном времени.

Вышеперечисленные преимущества биспектральной обработки сигналов позволяют точно измерить пространственные проекции волнового вектора на оси координат, и, тем самым, определить направление прихода сигнала, даже при отношении сигнал/помеха близким к единице.

Моделирование и практическое выявление фрактальной структуры кардиоинтервалограммы (КИГ). Рассматривая организм человека можно сказать, что он представляет из себя динамическую систему, параметры которой меняются в зависимости от целого ряда внешних факторов. Поэтому он, с одной стороны, достаточно хаотичен, потому как его состояние определяется множеством внутренних факторов, но с другой стороны – он действует по устойчивым закономерностям с определенной цикличностью. Так основываясь на данные этих закономерностей можно определить динамику изменений его состояния.

Для моделирования и дальнейшего исследования состояния организма, а так же выявления изменений, которые произойдут в нем, в данной работе мы прибегнем к использованию фрактальной обработки сигнала. В качестве исходного сигнала будет использована КИГ. Для обработки применяется индекс фрактальности, как параметр, наиболее выгодно используемый в сравнении с другими фрактальными показателями.

Наиболее известной классификацией фрактальных временных рядов является так называемая $1/f$ – классификация, или классификация по спектру Фурье временного ряда. Фурье-спектр хаотических временных рядов обычно описывается соотношением

$$A \sim 1/f^d,$$

где A – амплитуда, f – частота, а d – показатель в зависимости от значения которого процесс относится к одному из трех принципиально различных процессов. Так, если в процессе наблюдаются следующие значения: $d \approx 1$ соответствует нормальному состоянию организма; $d > 1$ характеризует перенапряжение некоторых систем или органов, а если $d < 1$, то присутствует, соответственно, угнетение систем. И как следствие выбирается терапевтическая процедура, которая сможет повлечь за собой обратный процесс (приведение к норме) [6].

Для подтверждения вышесказанного были проведены ряд измерений, разной периодичности и длительности. При дальнейшей обработке полученных данных выявлено сходство с рассмотренной теоретической моделью Фурье-спектра. Так, приведенный на рис. 4 график, полученный в краткосрочном измерении, характеризует состояние организма на момент измерения.

При подробном рассмотрении графика следует отметить, что для получения более четкой картины периодических процессов в организме следует увеличить время замера (в идеале до времени цикла). Но и при столь малом замере уже начинают прослеживаются некоторые из них.

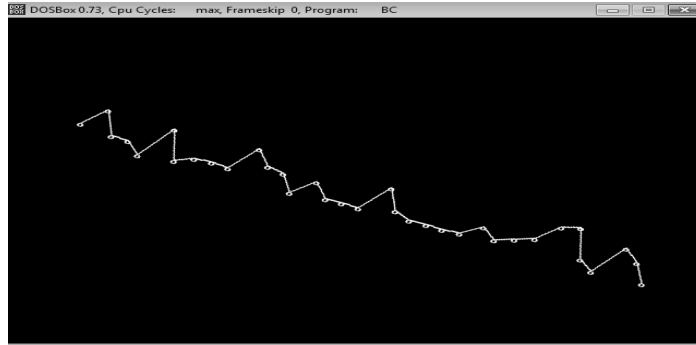


Рис. 4. Спектр RR-интервалов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Исакович М.А.* Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 496 с.
2. *Годин О.А.* Прохождение низкочастотного звука из воды в воздух // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53, № 3. – С. 353-361.
3. *Волощенко А.П., Тарасов С.П.* Экспериментальные исследования эффекта аномальной прозрачности границы раздела вода-воздух для низких частот // Сборник трудов научной конференции «Сессия научного совета РАН по акустике и XXIV Российского акустического общества». – М.: ГЕОС, 2011. – Т. 1. – С. 202-204.
4. *Канаков В.А., Горда В.В.* Ускорение поиска максимумов многомерной корреляционной функции по ее сечениям // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2009. – № 3. – С. 76-79.
5. *Горбань И.И.* Обработка гидроакустических сигналов в сложных динамических условиях. – Киев: Наукова думка, 2008.
6. *Алдонин Г.М.* Самоорганизация в гомеостазе и донозологическая диагностика // Моделирование неравновесных систем – 98: Тез. докл. I Всероссийского семинара. – Красноярск, 1998.

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

Волощенко Александр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: vigcorp@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

Куценко Александр Николаевич – e-mail: kan1208@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Октябрьская, 18/1, к. 46; тел.: 8863311-132; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; к.т.н.; доцент.

Резниченко Александр Анатольевич – e-mail: naos_88@mail.ru; 347928, г. Таганрог, 1-я Линия, 49; тел.: 89518221278; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

Слущкий Дмитрий Сергеевич – e-mail: sdiman85@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Азовская, 3-138; тел.: 89185101935; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

Voloshchenko Alexander Petrovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: vigcorp@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; postgraduate student.

Kutsenko Aleksandr Nikolaevich – e-mail: kan1208@mail.ru; 18/1-46, Oktyabrskaya street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634311132; the department of hydroacoustic and medical engineering; associate professor.

Reznichenko Aleksandr Anatolevich – e-mail: naos_88@mail.ru; 49, 1-st Line, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79518221278; the department of hydroacoustic and medical engineering; postgraduate student.

Slutsky Dmitry Sergeevich – e-mail: sdiman85@mail.ru; 3-138, Azovskaya street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185101935; the department of hydroacoustic and medical engineering; postgraduate student.

УДК 620.179.1

А.В. Угольков

**РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ
ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ**

Рассмотрен один из методов расчёта импульсной характеристики системы «пьезо-преобразователь-среда-дефект» с учётом особенностей дефектоскопии рельсов. Метод основан на расчёте параметров акустических сигналов только в заданных точках пространства, что существенно ускоряет процесс расчёта эхосигнала. Получен вид импульсной характеристики для нескольких моделей дефектов (точечный, плоский, цилиндрический). С использованием импульсных характеристик рассчитаны формы эхосигналов при воздействии прямоугольного радиоимпульса. Для верификации результатов моделирования проведены эксперименты, показавшие хорошее соответствие с результатами моделирования.

Пьезоэлектрический преобразователь; эхосигнал; дефектоскопия; импульсная характеристика.

A.V. Ugol'kov

**CALCULATION OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS IMPULSE
RESPONSES FOR VARIOUS DEFECTS AT ULTRASONIC FLAW
DETECTION**

The article dwells on one of the computing methods of system “piezoelectric transducer-environment-defect” with a glance features of flaw detection. The method based on the calculation acoustic signals parameters in defined space points only, that greatly speeds up the calculation process of the echosignal. The impulse response form was given for the some defect models (point, plane, cylindrical). The echosignals forms were calculated with impulse responses under the influence rectangle radio frequency pulse. For verification modeling results experiments were completed which have shown a good qualitative consistency with modeling results.

Piezoelectric transducer; the echosignal; flaw detection; impulse response.

Для обеспечения безопасности движения поездов широко применяются средства неразрушающего контроля рельсов. При этом выражена тенденция к все более широкому применению скоростных методов дефектоскопии и средств, позволяющих получить уточнённую информацию о координатах и пространственной ориентации дефекта. Для этого внедряются многоканальные датчики. При проектировании таких дефектоскопных систем необходим расчёт формы эхоимпульсов на каждом из датчиков, по различию которых и определяется необходимая информация о дефекте [1].

На расчёт эхосигнала влияет множество параметров: размеры, ориентация и взаимное положение излучателя и дефекта, частота излучения, свойства самого материала и внешней среды. Аналитическое решение этой задачи чрезвычайно