ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОЛИСПЕКТРАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ С ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ В ЗАВАЛАХ

Е.М. Богданова;
А.Н. Иванов, кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.
В.Н. Родин, кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский университет МВД России

Рассмотрены проблемы выделения полезного сигнала при поиске людей, которые в результате чрезвычайной ситуации оказались в замкнутом объёме (в завалах), на фоне акустических помех, создаваемых окружающей средой. Приведена упрощённая модель полезного сигнала. Показано, что при решении задачи идентификации сигналов от биологической системы для выявления нелинейной связи хороший эффект может дать использование полиспектральных характеристик сигналов.

Ключевые слова: акустическая энергия, гиперболическая симметрия, инфразвуковые частоты, спектральные характеристики Фурье, спектральные характеристики Меллина, моноспектральный анализ, полиспектральный анализ

APPLICATION OF THE METHOD OF POLYSPECTRAL ESTIMATION OF INFRASONIC SIGNALS WITH HYPERBOLIC SYMMETRY FOR DETECTION OF PEOPLE IN BLOCKAGES

E.M. Bogdanova; A.N. Ivanov.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia.
V.N. Rodin.
Saint-Petersburg university of the Ministry of internal affairs of Russia

Problems of allocation of a useful signal are considered by search of people who as a result of an emergency situation appeared in the closed volume (in blockages), against the acoustic hindrances created by environment. The simplified model of a useful signal is given. It is shown that at the solution of a problem of identification of signals from biological system for identification of nonlinear communication the good effect can give use of polyspectral characteristics of signals.

Keywords: acoustic energy, hyperbolic symmetry, infrasonic frequencies, Fourier's spectral characteristics, Mellin's spectral characteristics, monospectral analysis, polyspectral analysis

Задача поиска и обнаружения людей, оказавшихся в результате какой-либо чрезвычайной ситуации (ЧС) в завалах зданий и сооружений, под снежным и селевым покровами, является чрезвычайно важной для спасательных подразделений МЧС России.

Одним из возможных путей решения задачи по обнаружению и идентификации живого организма в замкнутом пространстве является использование механической энергии от объектов обнаружения в диапазоне инфразвуковых и низких звуковых частот.

В качестве физического явления, положенного в основу способа обнаружения живых организмов, используется излучение ими акустической энергии в диапазоне инфразвуковых и низких звуковых частот.

Другой составляющей этого метода является физико-математическая база информационной акустики, формирующая правила обработки сигналов, которые с максимальной полнотой используют априорную информацию о свойствах среды.

Учитывая современное состояние развития техники, создание приборов, позволяющих фиксировать такие сигналы, не представляется особо трудным. В спасательных подразделениях успешно применяются акустические приборы поиска пострадавших «Пеленг» (Россия), «Виброфон» (Франция) и др.

Сложность представляет процесс идентификации сигналов от человека или группы людей, находящихся в замкнутом объёме (в завалах), на фоне акустических помех, создаваемых окружающей средой.

При решении задачи идентификации сигналов от биологической системы хороший эффект может дать использование полиспектральных характеристик сигналов.

В основу исследования механизмов генерации акустических сигналов от живых организмов в области низких частот принят феноменологический подход, поскольку в критических условиях совместимости с жизнью организма доминируют сигналы от сердца, кровеносных сосудов и дыхания, и в первую очередь рассматриваются эти сигналы. В качестве модели генерации сигналов от живых организмов, отражающей природу этих сигналов, примем периодический процесс:

$$E\left\{s(t)\right\} = E\left\{s(t-T)\right\},\ E\left\{r(t)\right\} = E\left\{r(t-T)\right\},$$

где $E\left\{...\right\}$ – операция математического ожидания, $E\left\{s(t_1)\overline{s(t_2)}\right\} = r(t_1,t_2) = r(t_1-T,t_2-T)$ – корреляционная функция, T – период процесса.

Из теории систем известно, что нестационарные системы (к которым относятся и рассматриваемые биологические объекты) описываются дифференциальными уравнениями, которые имеют коэффициенты, зависящие от времени. Но также известно, что решение этих уравнений, если не определены дополнительные условия симметрии, является трудной задачей [1]. Чтобы обойти эту проблему, необходимо из физических соображений задать дополнительные условия симметрии (инвариантности) систем.

Работу сердца и лёгких в первом приближении можно представить как систему, у которой механические свойства (масса и жёсткость) линейно зависят от времени. В указанном случае будет сформирована нестационарная система, которая обладает гиперболической симметрией.

Рассмотрим механическую систему, у которой изменение скорости $f(t)$ происходит по следующим правилам:

$$m\cdot t\frac{df(t)}{dt} + rf(t) + \int_1^t \frac{f(t)}{Gt}dt = e(t),$$

где $m(t) = m\cdot t$ – масса, r – механическое сопротивление, $G(t) = Gt$ – жёсткость системы, $e(t)$ – приложенная сила. Данной моделью можно на фиксированном интервале времени описать поведение одного цикла дыхательной системы и сердца живого организма.

При формировании сигналов от биологических объектов присутствуют нелинейные эффекты. При этом для некоторых классов нелинейных эффектов выполняются многие свойства, присущие линейным системам [2].

Для учёта нелинейных свойств работы сердца и дыхательной системы рассмотрим нелинейный гиперболический объект, аппроксимируемый рядом Вольтера:

$$y(t) = .\int_1^{t_n} h_1(\tau_1)x(t/\tau_1)\frac{d\tau_1}{\tau_1} + \int_1^t\int_1^t h_2(\tau_1,\tau_2)x(t/\tau_1)x(t/\tau_n)\frac{d\tau_1.\ d\tau_n}{\tau_1.\ \ \tau_n} + \dots .$$

Для исследования нелинейных и нестационарных систем гиперболического типа целесообразно воспользоваться многомерным преобразованием Меллина:

$$C(s) = M\left(c(t)\right) .$$

Это позволяет упростить решение уравнений.

Отклик звена системы в частотной области можно записать:

$$Y(s) = \frac{1}{2\pi \cdot i}\int_{p-i\infty}^{p+i\infty} Y(s-s_1, s_1)ds_1 = \frac{1}{2\pi \cdot i}\int_{p-i\infty}^{p+i\infty} U(s-s_1)A(s-s_1)U(s_1)B(s_1)ds_1 .$$

Следовательно, для всей системы в целом в частотной области отклик имеет представление:

$$Z(s) = C(s)Y(s) = C(s)\frac{1}{2\pi \cdot i}\int_{p-i\infty}^{p+i\infty} U(s-s_1)A(s-s_1)U(s_1)B(s_1)ds_1 =$$
$$= \frac{1}{2\pi \cdot i}\int_{p-i\infty}^{p+i\infty} U(s-s_1)A(s-s_1)U(s_1)B(s_1)C(s-s_1+s_1)ds_1 .$$

Применяемые при обработке сигналов методы, основанные на анализе спектра мощности (или автокорреляции), не позволяют, при одинаковых условиях резонанса, установить различие между нелинейно связанными и самопроизвольно возбуждаемыми независимыми волнами. Для того чтобы добиться такого разрешения, необходимо воспользоваться спектрами высокого порядка, что позволит сформировать признаки для идентификации живых организмов на фоне помех.

Остановимся на вопросах моноспектрального анализа. Для оценки степени когерентности сигналов по каналам (как минимум двум) будем применять функцию когерентности меллиновских спектров. Это объясняется тем, что при обмене энергией между каналами для гиперболических систем в качестве объектов исследования должны использоваться взаимные меллиновские спектральные плотности. Формирование меллиновского спектра выполняется согласно правилу [3]:

$$M\left\{s(t)\right\} = F\left\{s\left(\exp(t)\right)\right\} .$$

Соотношение сводит преобразование Меллина к операции интерполяции сигнала по закону $t \to \ln(t)$ и операции преобразования Фурье, для которой существует быстрый алгоритм БПФ (алгоритм быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье). При оценке взаимных меллиновских спектров в качестве объектов сравнения используют временные характеристики сигналов, заданных в области положительного времени. Это объясняется тем, что при вычислении меллиновского спектра анализируемые процессы определены на луче $\left(0,\infty\right)$. Исходя из сказанного, предлагается при длительности спектральной выборки N выбрать шаг дискретизации из условия $\sum_{n=1}^{\infty} a^n = N = \frac{1}{1-a}$, то есть взять $a = 1 - \frac{1}{N}$, равное знаменателю геометрической прогрессии.

Нетрудно видеть, что $\left|G_{xy}(f)\right|^2 \le G_{xx}(f)\cdot G_{yy}(f)$, где $G_{xy}(f)$ – взаимная меллиновская спектральная плотность сигналов по каналам, $G_{xx}(f), G_{yy}(f)$ – спектральные плотности каждого канала.

Теперь можно определить функцию когерентности (называемую иногда квадратом когерентности) для меллиновских спектров. В отличие от известного определения [4] здесь рассматриваются не спектральные характеристики Фурье, а спектральные характеристики Меллина:

$$\gamma_{xy}{}^{2}(f)=\frac{\left|G_{xy}(f)\right|^{2}}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}=\frac{\left|S_{xy}(f)\right|^{2}}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}.$$

Функция когерентности для любых f удовлетворяет неравенствам:

$$0\le\gamma_{xy}{}^{2}(f)\le 1.$$

Комплексная функция когерентности $\gamma_{xy}(f)$ определяется формулой:

$$\gamma_{xy}(f)=\left|\gamma_{xy}(f)\right|e^{-j\theta_{xy}(f)},$$

где
$$\left|\gamma_{xy}(f)\right|=+\sqrt{\gamma_{xy}{}^{2}(f)},$$

а $\theta_{xy}(f)$ – фазовый угол $G_{xy}(f)$.

Как следует из анализа литературных данных, одним из эффективных методов идентификации стационарных объектов является метод полиспектрального оценивания. Традиционно перед этим методом ставились следующие задачи:

– измерения отклонения анализируемого временного ряда от нормального процесса;

– оценки фазы сигналов;

– выявление и описание свойств нелинейных механизмов, порождающих временные ряды [5].

Для применения метода полиспектрального оценивания для систем с другой формой симметрии разработаны соответствующие математические модели, обеспечивающие оценивание информативных параметров организма человека.

Однако прежде чем перейти к решению задачи идентификации сигналов от живых организмов, остановимся на решении задачи обращения влияния канала на сигнал.

Сначала рассмотрим линейную, но не инвариантную во времени систему. Поставим задачу определения входного воздействия по её измеренному отклику, или иначе задачу обращения воздействия. Системы, решающие обратную задачу анализа, называют инверсными системами:

$$x(t)+\int_{0}^{t}h(t,\tau)x(\tau)d\tau=g(t),\tag{1}$$

где h – непрерывная функция двух переменных t и τ при t > 0, 0 < τ < t.

Полагая, что:

$$h^{(2)}(t,\eta)=\int_{\eta}^{t}h(t,\tau)h(\tau,\eta)d\tau$$
$$,$$
$$h^{(n)}(t,\eta)=\int_{\eta}^{t}h^{(n-1)}(t,\tau)h(\tau,\eta)d\tau$$

найдём ядро уравнения:

$$-k\left(t,\eta\right)=h(t,\eta)-h^{(2)}(t,\eta)+...+(-1)^{n-1}h^{(n)}(t,\eta)+... ,$$

где окончательно решение уравнения даётся формулой [6]:

$$x(t)=g(t)+\int_{0}^{t}k(t,\tau)y(\tau)d\tau .$$

Таким образом, уравнение (1) может обратить сигнал в том смысле, чтобы исключить влияние канала на сигнал. Следует также заметить, что для обращения необходимо иметь модель импульсной характеристики канала $h(t,\eta)$. Следует также иметь в виду, что каналы распространения сигналов от живого организма, как правило, дисперсные, то есть скорость распространения зависит от частоты.

Пусть H(f) – частотная характеристика линейного фильтра моделирующего канал.

Представим её в виде:

$$H(f) = 1+iM(f),\ M(f)=D(f)+iA(f),$$
$$H(f)=\sqrt{\left(1\text{-}A(f)\right)^2+D^2(f)}\exp\left(i\theta(f)\right),$$

где D(f) называется дисперсивной частью, а A(f) – абсорбтивной частью, $\theta(f)$ – фазовый угол фильтра. Такая терминология оправдана следующими соображениями:

Пусть $s(t) = s_0\cos2\pi ft = \mathrm{Re}(s_0\exp(i2\pi ft))$, то есть s(t) – чисто синусоидальное «физическое» напряжение. Тогда, учитывая, что для фильтра $H(f)^* = H(-f^*)$, $\mathrm{Re}(H(f)) = \mathrm{Re}(H(-f))$, $\mathrm{Im}(H(f)) = -\mathrm{Im}(H(-f))$, имеем на выходе напряжение:

$$x(t) = \mathrm{Re}\{s_0\{H(f)\exp(i2\pi ft)\}\} = \mathrm{Re}(\{H(f)\exp(i2\pi ft)\}) =$$
$$= \mathrm{Re}\,(s_0\{(1-A(f)+iD(f))\exp(i2\pi ft)\}) =$$
$$= s_0((1-A(f)\cos(2\pi ft)) - D(f)\sin2\pi ft).$$

Таким образом, $s_0A(f)$ – потеря (или прирост) амплитуды первоначальной входящей «волны» (при поглощении или усилении её), а $D(f)\sin2\pi ft$ – новая, сдвинутая по фазе «волна», появившаяся на выходе.

При описании каналов пользуются дисперсионным соотношением. Дисперсионное соотношение – это условия, связывающие дисперсивную часть D(f) в точке f_0 с интегралом от абсорбтивной части по всем частотам, взятым с весом $1/(f\text{-}f_0)$.

Формально дисперсионное соотношение записывается [7]:

$$D(f_0)=-\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}A(f_1)\frac{1}{f_0-f_1}df_1=\left(A(f)*-\frac{1}{\pi f}\right)(f_0)\cdot$$

Заметим, что интеграл поднимется в смысле главного значения.

Дисперсионное соотношение – важное средство для синтеза электрических схем (например, приближённой реализации фильтра с заданной частотной характеристикой с помощью четырёхполюсников).

На практике дисперсность обычно приводит к увеличению скорости распространения сигнала с ростом частоты. Поэтому, если входной сигнал x(t) проходит через дисперсную среду, то высокочастотные составляющие x(t) достигнут приёмника y(t) быстрее, чем низкочастотные. Скорость распространения импульса сигнала называется групповой скоростью c_g, которая связана с фазовой скоростью c_f, но не равна ей.

Групповая скорость волн изгиба, проходящих по балке, даётся соотношением [4]:

$$c_g = 2\sqrt{1.8hfc},$$

где c – скорость продольных волн, h – толщина балки.

При использовании взаимной корреляционной обработки выделяются два пути распространения сигнала. В дисперсном случае передаточная характеристика уже не будет линейно зависеть от частоты, но будет иметь другой вид, определяющий характер распространения сигнала в зависимости от частоты. Например, в случае, когда акустическая энергия распространяется по балке, имеет место набег фазового угла равный:

$$\theta(f) = 2\pi fR / c_g = \pi r\sqrt{f} / \sqrt{1.8hc} \quad .$$

Поэтому одним из признаков наличия человека будет пропорциональность фазы квадратному корню из частоты.

Во многих случаях акустическая энергия может распространяться по неоднородным каналам с двумя и более скоростями. В механических конструкциях распространение энергии может происходить в виде как бездисперсных продольных волн, так и дисперсных волн изгиба. Динамическая энергия может распространяться, например, в завалах здания через конструкции, при этом продольные волны распространяются через бетон и стержни арматуры, а волны изгиба через конструкцию в целом. Ожидается, что взаимно-ковариационный анализ сигналов в полосах шириной в октаву при центральных различных частотах позволит определить вклад каждой из этих составляющих. Продольные волны легко отличить от волн изгиба, так как они бездисперсные, и поэтому их время запаздывания одинаково на всех частотах.

Теперь исследуем методы полиспектрального оценивания для сигналов, формируемых от гиперболических систем. Известно, что из-за квадратичной нелинейности фазовая связь между составляющими двух частот процесса приводит к появлению вклада в мощность на частоте, равной их сумме (условие резонанса). Такая связь оказывает влияние на последовательность семиинвариантов (моментов) третьего порядка, и поэтому для выявления и описания подобных нелинейных эффектов используется биспектр.

В настоящее время известны данные применения биспектра в океанографии, геофизике и науках о Земле, пассивной гидролокации, медицине, связи и обработке речи. Методы цифровой обработки сигналов, разработанные на основе использования спектров высоких порядков, применяются для оценивания фазы сигналов и обращения свёртки, обнаружения сигналов, идентификации нелинейных, неминимально-фазовых цепей и импульсно-пачечных процессов, оценивания моментов вступления сигналов и выявления квадратичной фазовой связи, а также различения звонких и фрикативных фонем речи [8].

Хотя в области оценивания с помощью спектров высокого порядка проведена значительная работа, главным образом группой специалистов по математической статистике, она нуждается в дальнейших исследованиях и пока ещё далека от тех успехов, какие достигнуты в области методов оценивания спектров мощности. Существует весьма настоятельная потребность в разработке более эффективных и быстрых методов оценивания спектра Меллина высокого порядка (СМВП) и выявлении прикладных задач, при решении которых могли бы быть получены непосредственные выгоды от их применения. В то же время следует отметить, что отсутствие достаточно общей теории, дающей полное представление о возможностях полиспектров и трудностях вычислительного и статистического характера, связанных с их применением, отчасти способствует пессимистическому отношению к полиспектрам [7]. Пожалуй, наиболее распространённая причина неудовлетворенности – это трудность вычисления и интерпретации спектров высоких порядков в целом. Однако понимания и правильного истолкования полиспектров легко добиться, располагая хорошей моделью или имея полное представление о внешних условиях, порождающих наблюдаемые данные.

Известны методы полиспектрального оценивания, применяемые к определению временной задержки [7]. Распространим эти методы на оценку параметра сжатия (расширения).

Пусть {x(t)} и {y(t)} – две последовательности результатов измерений с помощью датчиков, удовлетворяющие уравнениям:

$$y_1(t) = s(t) + n_1(t)\,,\; y_2(t) = \sqrt{\alpha}\, s(t\alpha) + n_2(t)\,, \tag{2}$$

где $s(t)$ – сигнал, $\sqrt{\alpha}\, s(t\alpha)$ – тот же сигнал, но со сжатием, а $n(t)$, $n_1(t)$, $n_2(t)$ – неизвестные источники шума. Задача состоит в оценке параметров α и τ по конечным записям {x(t)} и {y(t)}.

Если источники шума представляют собой независимые случайные процессы с нулевым средним, то основная операция по «сравнению степени сходства» между {x(t)} и {y(t)} состоит в определении мультипликативной и аддитивной взаимных корреляций, которые в идеальном случае описываются соотношениями:

$$r_{xy}(\mu) = E\big(x(t\mu)\, y(t)\big). \tag{3}$$

В точках $\mu = \alpha$ взаимные корреляционные функции достигают максимума. Действительно, соотношения (3) можно записать:

$$\begin{aligned} r_{xy}(\mu/\alpha) &= E\Big(\int S(f_1)\exp\big(-i2\pi f_1 \ln(t\mu)\big)\, d\eta(f_1) \overline{\int S(f_2)\exp\big(-i2\pi f_2 \ln(t\alpha)\big)\, d\eta(f_2)}\Big) = \\ &= \int \big|S(f_1)\big|^2 \exp\big(-i2\pi f \ln(\tau\mu/\alpha)\big)\, df = M^{-1}\Big\{\big|S(f)\big|^2\Big\}(\mu/\alpha) \end{aligned},$$

где $d\eta(f_1)$ – стандартная стохастическая мера, $E\{d\eta(f_1)d\eta(f_2)\} = \delta(f_1 - f_2)$.

Видно, что функцию $\big|S(f_1)\big|^2 \exp\big(-i2\pi f \ln(\mu/\alpha)\big)$ можно интерпретировать как взаимные спектры Меллина относительно двух каналов. В прикладных задачах из-за конечной длительности записей выборок, оценки корреляционных функций флюктуируют. Для улучшения формы функции взаимной корреляции применяют операции сглаживания оценок и весового умножения входных данных. Для оценивания параметров предложены также методы, в которых используются функции автокорреляции и взаимной корреляции. К ним относятся такие методы, как метод наименьших квадратов и метод винеровской фильтрации [9]. Каждому из названных методов присущи определённые недостатки, зависящие от характера сигнала и источников шума.

В тех случаях, когда сигнал можно считать негауссовским случайным стационарным процессом, а источники шума {n(t)} – независимыми стационарными гауссовскими процессами, степень сходства между {x(t)} и {y(t)} можно также «сравнивать» в областях спектров высоких порядков, например биспектра или триспектра. Заметим, что самоизлучающиеся сигналы от сложных механических систем содержат сильные квазипериодические составляющие и поэтому могут рассматриваться как негауссовские сигналы [10]. Основным аргументом в пользу применения спектров высоких порядков в задачах оценивания мультипликативного параметра и задержки при названных выше допущениях послужил тот факт, что они применимы для гипотезы негауссова шума. Если сигналы $x(t)$ и $y(t)$ задать соотношениями (2), то справедливы следующие тождества для мультипликативной симметрии:

$$rm_{x_1y_1x_2y_2}(\alpha)=E\left(x_1(t\alpha)\,y_1(t)\,\overline{x_1(t\alpha\nu)\,y_1(t\nu)}\right)=rm_{x_1y_1}(\alpha)\,\overline{rm_{x_1y_1}(\alpha)}=\left|rm_{x_1y_1}(\alpha)\right|^2. \qquad (4)$$

Из анализа (4) можно сделать вывод, что сформированные корреляционные функции отличаются от взаимных корреляционных функций нулевого порядка квадратичной зависимостью. Известно, что квадратичный отклик корреляционной функции увеличивает разрешающую способность измерителя мультипликативного параметра. Но необходимо признать, что последнее достигается за счёт уменьшения выходного отношения сигнал-помеха обнаружителя.

Литература

1. Наймарк М.А. Теория представления групп. М.: Наука, 1976. С. 558.

2. Ковтуненко С.В., Левин Э.А., Сапрыкин В.А. К вопросу представления гидроакустических сигналов // Труды СГ-5. Новосибирск. 1974. С. 116–119.

3. Ремли В. Влияние доплеровской дисперсии на обнаружение и разрешающую способность при использовании согласованных фильтров // Труды института инженеров по электронике и радиоэлектронике. 1966. Т. 54. № 1. С. 39–46.

4. Сапрыкин В.А., Тынянкин С.И. Функция неопределённости Меллина // Радиотехника. 1990. № 11. С. 6.

5. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. М.: Наука. 1967. С. 478.

6. Гельфанд И.М., Граев М.И., Пятецкий-Шапиро И.И. Теория представлений и автоморфные функции. М.: Наука. 1966. С. 512.

7. Назаренко А.А. О порядке убывания на бесконечности функции, преобразование Фурье которой локализовано на пространственной кривой: матер. IX Межвуз. науч.-техн. конф. «Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы, подготовка специалистов». Петродворец: Воен.-морск. ин-т радиоэлектроники им. А.С. Попова, 1998. С. 52.

8. Бараненко А.А. К вопросу о представлении широкополосных сигналов: тр. науч.-техн. конф. «Проблемы современной радиоэлектроники». Петродворец, 1995. С. 21–23.

9. Журден Г., Журден Ж. Характеристика акустических каналов связи с подводной лодкой / Подводная акустика и обработка сигналов: сб. М.: Мир, 1985. С. 459–463.

10. Бараненко А.А., Назаренко А.А. Метод быстрого вычисления спектра Меллина: матер. X Воен. науч.-техн. конф. СПб.: С.-Петерб. высш. воен. инж. училище связи, 1998. С. 221.