

Комбинация 1324 дает величину неоднозначности 66,6 TECU, что также позволяет говорить о восстановлении абсолютного ПЭС, а необходимая точность фазовых измерений около 1°.

Последовательное использование комбинаций, дающих грубые результаты для разрешения неоднозначностей более точных, позволяет снизить требования к точности определения фазы сигналов в приемной аппаратуре. Применение комбинаций 2434, 1323, 2334 и 1223 позволяет получить неоднозначность 66,6 TECU при точности не хуже 0,01 TECU, не требуя высокоточной приемной аппаратуры (достаточной является точность определения фазы ~30°).

Литература

1. Богданов В.А., Сорочинский В.А., Якшевич Е.В. Спутниковые системы морской навигации // М.: Транспорт, 1987. 200 с.
2. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ Под Г-52 ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. — М.: ИПРЖР, 1998. 400 с.
3. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
4. Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исследование Земли из космоса, 2008, №2, с. 14-20
5. Bernhard P., Seifring C. Improved Ambiguity and Resolution for Total Electron Content Measured with the Three Transmitted Frequencies from the COSMIC TBB Instrument, Taiwan, Joint Geosciences Assembly, 2004
6. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 155 с.

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО
АНАЛИЗА И ТЕОРИИ ВЕЙВЛЕТОВ
NEW TECHNOLOGIES OF MEASUREMENT INFORMATION ANALYSIS AND
PROCESSING ON THE BASIS OF THE ACHIEVEMENTS IN THE REALMS OF TIME-
FREQUENCY ANALYSIS AND WAVELET THEORY**

Н.И. Орешко, В.В. Геппенер, Д.М. Клионский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”

oreshko@nicetu.spb.ru, geppener@mail.ru, klio2003@list.ru

The problem of complex dynamic objects tracking encountered, when testing new samples of space and rocket hardware or new aircraft require us to use a number of specially constructed observation facilities: radio, optical, GPS, etc. For the purpose of calculating trajectory parameters it is necessary to employ special software and mathematical base. This is connected with the features of instruments involved and with the conditions under which a particular experiment is conducted. Special methods and software systems are also needed for dealing with a number of tasks that arise in geology and geophysics.

The presence of an enormous number of disturbing factors and heightened requirements to the accuracy and reliability of measurements led to the development of mathematical tools and methods aimed at dealing with random processes and intended to rest upon advanced achievements in several mathematical areas. These areas encompass mathematical statistics, time series analysis, time-frequency analysis, wavelet theory, artificial intelligence and other knowledge domains.

Processing and analysis of measurement data on the basis of the contemporary achievements in time-frequency analysis, wavelet technology and other adaptive methods along with time series models proved effective and reliable when processing real data of large volume containing noise, outliers, misses and other perturbing factors. The robustization of the methods allowed us to use them under the conditions of the measurements errors.

Для задач слежения за различными классами сложных динамических объектов (СДО) [1], например, при испытании новых образцов ракетной и космической техники или новых летательных аппаратов, используются различные средства наблюдений: радиотехнические, оптические, GPS и др. Для расчета параметров траектории по результатам этих внешнетраекторных измерений [1] необходимо использовать специализированное программно-математическое обеспечение. Это связано, прежде всего, со спецификой самого измерительного средства, а также с условиями проведения эксперимента. Наличие большого числа возмущающих факторов и высокие требования к точности и достоверности измерений обусловили развитие математических средств обработки случайных процессов на основе

использования современных достижений в анализе временных рядов, частотно-временном анализе, теории вейвлетов, теории искусственного интеллекта и др. научных областях.

Основными математическими трудностями при оптимальной обработке результатов измерений являются проблемы фильтрации случайных погрешностей при неизвестных законах их распределения на фоне динамического процесса с неизвестной моделью, а также оценивание систематических погрешностей. Для этого необходимо использовать специализированный математический инструментарий по фильтрации случайных погрешностей как для активного участка траектории, так и для пассивного при обработке результатов измерений. Важная научная и практическая задача возникает и при оценивании систематических погрешностей в имеющихся результатах измерений на основе их совместной обработки, т.е. за счет использования *структурной избыточности*. Разработанный математический аппарат должен оценивать систематические погрешности в привязке к шкалам системы единого времени и геодезических параметров, характеризующих положение системы на местности.

Интенсивно развивающееся в последние годы направление обработки и анализа *телеметрических* и *внешнетраекторных* измерений (ТМИ и ВТИ) связано с обработкой и анализом процессов, отражающих состояние объекта в процессе полета. Прежде всего, необходимо решать задачи связанные с многомерным характером протекающих процессов, их нестационарностью, зачастую колоссальным объемом данных и наличием большого числа возмущающих факторов. Под ТМИ [1] понимается показатель физического процесса, события или явления, значение или поведение которого подлежит измерению или контролю телеметрической системой. ВТИ направлены на непосредственное или опосредованное вычисление параметров, характеризующих положение и движение некоторого объекта в пространстве.

Основными задачами являются анализ поведения параметров конструкции в процессе полета СДО в условиях высокочастотных (шумовых) и низкочастотных помех на основе частотно-временного анализа вибрационных, акустических и виброударных процессов.

При обработке сигналов, поступивших от СДО, рассматривают медленно меняющиеся параметры (ММП) и быстро меняющиеся параметры (БМП) [1]. Виброизмерения [1] на объекте проводятся в соответствии с задачами на летные испытания на основании программы ТМИ БМП. Программа ТМИ разрабатывается с целью определения фактических режимов виброн нагружений силового корпуса СДО, а также ее отдельных систем и агрегатов (приборов) и для решения отдельных диагностических задач. Виброизмерения проводятся радиотелеметрическими системами или автономными регистрирующими устройствами с помощью датчиков и усилительно-преобразующей аппаратуры, обеспечивающей получение соответствующей информации в различных областях частот.

Вибрации по своим характеристикам и продолжительности действия делятся на ударные вибрации, вибрации на переходных режимах, вибрации на установившихся (квази)стационарных режимах. К первой группе относятся вибрации, возникающие в результате воздействия ударных (импульсных) нагрузок. Эти вибрации характеризуются ускорениями высокого уровня при малом времени воздействия нагружающего фактора. Ко второй группе относятся вибрации, характеризующиеся нестационарностью и относительно малым временем воздействия. К третьей группе относятся установившиеся вибрации, включая акустические нагружения, работу виброактивных элементов и колебательные процессы. Эти вибрации характеризуются стационарностью протекания процессов и относительно большим временем их протекания.

Для обработки нестационарных процессов, к которым относятся переходные, виброударные и акустические процессы, а также некоторые участки вибрационных процессов, необходимо использовать так называемые *современные методы частотно-временного анализа* [2], позволяющие отслеживать как изменение частотного содержания анализируемого процесса, так и определять начало и окончание характерных деталей этого процесса. Частотно-временной анализ дает возможность анализировать процесс на трехмерной плоскости с сохранением информации о времени, частоте и амплитуде. В результате возможно выявление скрытых модуляций в сигналах (амплитудных и частотных), идентификация областей концентрации энергии. Появляется возможность извлечения информации о начале и окончании различных процессов в исходном сигнале, а также об эволюции их частотного содержания. Поскольку большей частью рассматриваемые сигналы являются мультикомпонентными, частотно-временной анализ позволит произвести идентификацию этих компонент для последующего отдельного анализа. При этом используются два взаимно дополняющих подхода. Первый подход состоит в применении так называемой *атомной декомпозиции*, при которой осуществляется декомпозиция сигнала на элементарные компоненты, атомы, которые хорошо локализованы по времени и частоте. Второй подход к этой проблеме состоит в вычислении распределения энергии сигнала по двум переменным: времени и частоте. Это приводит к *энергетическому частотно-временному*

распределению, которое является квадратичным преобразованием сигнала. К таким преобразованиям относится, в частности, широко используемое распределение Вигнера-Вилле. На рис. 1 приведены примеры обработки одного из участков нестационарного телеметрического процесса (участок с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ)) на основе использования классического подхода, базирующегося на Фурье-преобразовании, и второго подхода (рис. 2) на основе частотно-временных распределений. Также показан (рис. 3) пример получения трехмерного частотно-временного распределения для БМП.



Рис. 1. Обработка ЛЧМ сигнала на основе преобразования Фурье

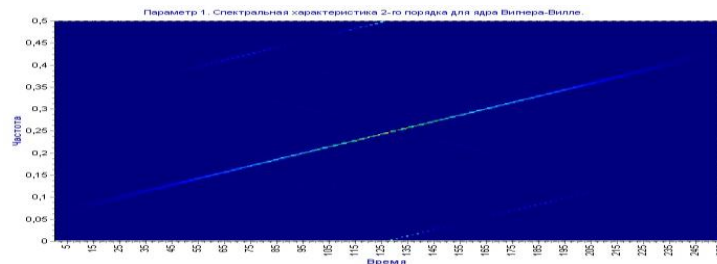


Рис. 2. Обработка ЛЧМ сигнала на основе распределения Вигнера-Вилле

Из первого графика невозможно установить закон изменения мгновенной частоты сигнала, т.е. другими словами, неизвестна *эволюция* его частотного содержания. Из частотно-временного образа ясно виден линейный закон изменения частоты.

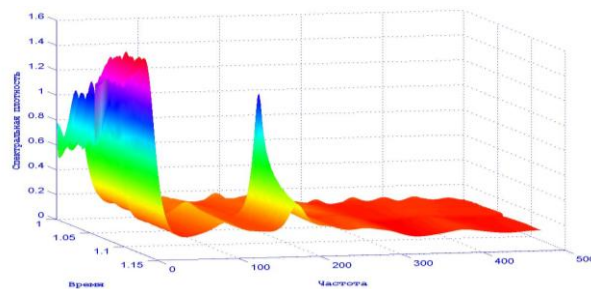


Рис. 3. Пример трехмерного частотно-временного распределения для БМП

Ниже приведен пример обработки локализованного во времени телеметрического процесса. Еще один пример, иллюстрирующий эффективность частотно-временного анализа продемонстрирован на рис. 4 для локализованного во времени процесса с гауссовой огибающей.

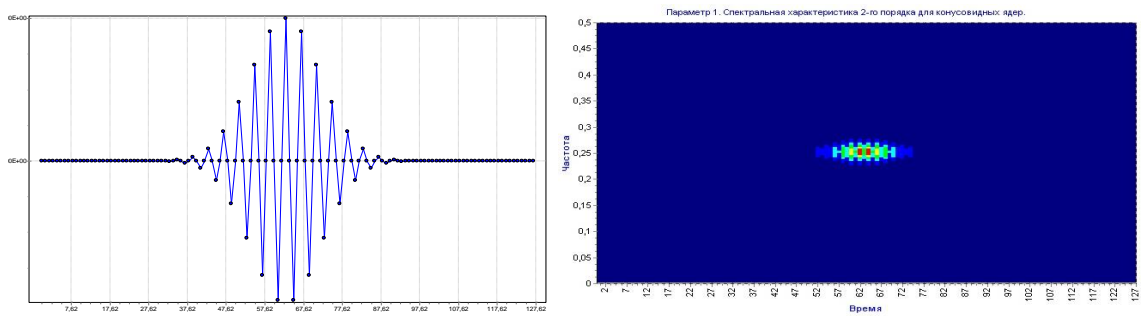


Рис. 4. Слева показан телеметрический процесс, локализованный во времени, справа - тот же процесс в частотно-временной плоскости

Из рисунков видна эффективность частотно-временного анализа при определении моментов начала и окончания характерных деталей анализируемого процесса.

Эффективным применением данного подхода оказалась возможность его использования при анализе эволюционирующего объекта при отсутствии телеметрических данных, т.е. только по результатам слежения средствами ВТИ. Пространственные эволюции можно рассматривать как некоторые нестационарные процессы, параметры которых (частота и амплитуда) изменяются во времени по неизвестному закону с неизвестными моментами начала и окончания процесса. На основе такого подхода появляется возможность определять законы изменения параметров пространственных колебаний по всем плоскостям движения объекта, что, в частности, позволяет проводить анализ влияния резонансных явлений на его динамику.

При обработке данных ВТИ и ТМИ в качестве эффективного подхода используется подход, основанный на применении так называемой *вейвлет-технологии* [3]. В основе этого подхода заложены три базовые идеи:

1) Анализируемый процесс рассматривается в виде комплектов (представлений) того же самого процесса, но с различным временным разрешением, начиная от самого тонкого разрешения, при котором воспроизводятся локальные детали, и заканчивая самым грубым, направленным на отображение лишь глобальной тенденции (тренда). Это позволяет рассматривать его разной степенью точности и тем самым выявлять характерные особенности в различных частотных диапазонах.

2) Использовании очень большой совокупности базисных функций (т.е. таких функций, или “строительных блоков”, с помощью которых может быть адекватно и компактно описан анализируемый процесс), характерной особенностью которых является способность отслеживать тонкие локальные детали в анализируемом процессе. Это так называемые функции с *компактным носителем*, которые определены на конечном интервале. Характерной особенностью этих функций является также и то, что они порождаются обычно некоторой единственной функцией (материнской) и посредством операций трансляции (сдвига) и растяжения-сжатия образуют полное семейство базисных функций. Использование таких базисов позволяет на основе малого числа коэффициентов разложения описать широкий класс нестационарных (а значит, и стационарных) процессов. Подобный результат не имеет места для других стандартных ортогональных базисов, требующих значительного количества дополнительных коэффициентов для описания деталей процесса в окрестности точек разрыва и подавления эффекта Гиббса.

3) Построение алгоритмов, которые могли бы быть легко реализованы на современных компьютерах и обладали бы высоким быстродействием. Все эти три базовые идеи нашли свое отражение в совокупности методов, которые объединены в понятие “вейвлет-технология”. Использование такого подхода позволяет на основании единых принципов производить очистку от шума данных ВТИ и ТМИ при полном незнании как модели вредного шума, так и модели изменения ТМИ, а также при наличии участков с разной степенью гладкости (гладкие участки, участки с резким изменением или с разрывами в производных). Вейвлет-технология эффективно работает в отношении данных, характеризующие высокочастотные участки полета объекта для ВТИ и данных, соответствующих участкам резкого изменения перегрузок, моментам ударов для ТМИ.

Разработанные технологии позволяют обрабатывать сложные динамические процессы на фоне не только гауссовского шума, но и на фоне шумов с другими распределениями.

Наряду с использованием характерных свойств вейвлет-базисов, важнейшей чертой данного метода является также эффективное применение идей мультимасштабного или мультиразрешающего анализа исходного сигнала [3]. Это дает пользователю возможность применять “математический микроскоп” для исследования данных, рассматривая их поведение при различных “увеличениях”. При

высоком уровне разрешения исследуется тонкая структура данных, а при низком уровне наглядно прослеживается глобальное поведение процесса в целом. Вейвлет-технология приводит к возможности анализа данных в различных частотных полосах от самых высокочастотных (для тонких деталей) до низкочастотных областей (для описания глобального поведения процесса).

В очищенном от шума сигнале можно с гораздо более высокой вероятностью, чем в исходном, обнаружить (выделить) и затем классифицировать скрытые закономерности. Особенно это важно для критических участков, на которых проявляются характерные особенности поведения СДО, представляющие интерес для оценки возможных его модификаций.

Анализ больших массивов данных, содержащих или длиннопериодические зависимости, или редкие, но важные характерные детали быстропротекающих процессов, обычно трудно поддается человеческому восприятию. Возможность выявления таких зависимостей, а также некоторых кратковременных процессов в изменении поведения объекта является весьма актуальной задачей. Для этого предлагается визуализировать не сам сигнал, а некоторым образом преобразовать его, чтобы все характерные особенности проявились автоматически. В качестве таких преобразований можно использовать вейвлет-преобразование, преобразования, переводящие сигнал в частотную область для выявления периодических компонент, а также преобразования в частотно-временную плоскость, позволяющие отслеживать изменение частотных свойств сигнала во времени.

Литература

1. А.В. Назаров, Г.И. Козырев, И.В. Шитов Современная телеметрия в теории и на практике / Наука и техника, Санкт-Петербург, 2007.
2. D.M. Klionsky, N.I. Oreshko, V.V. Geppener Empirical Mode Decomposition in Segmentation and Clustering of Slowly and Fast Changing Non-Stationary Signals / Pattern Recognition and Image Analysis. – 2009. - Vol. 19, № 1. – pp. 14-29. – Bibliog.: p. 29.
3. Н.И. Орешко, Т.Н. Князева Вейвлет-технология анализа и очистки сигналов от шума / Цифровая обработка сигналов. – 2008. - № 3. – С. 21-25. – Библиогр.: с. 25.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПЕРЕНОСА РАДОНА В СИСТЕМЕ ГРУНТ-АТМОСФЕРА С ПОСТОЯННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ MATHEMATICAL MODELING OF RADON TRANSFER IN THE SYSTEM SOIL-ATMOSPHERE WITH CONSTANT COEFFICIENTS

Р.И. Паровик

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, romano84@mail.ru

The process of unsteady transport of radon in the soil-atmosphere system is considered. An analytical solution of this model under the assumption that the transfer characteristics are constants.

Введение. Изучение процессов переноса радона в системе грунт-атмосфера представляет определенный научный интерес. Это вызвано тем, что радон является индикатором напряженно-деформированного состояния геосреды и оказывает воздействие на некоторые геофизические поля [1]. Например, радон участвует в формировании электрического поля приземного слоя атмосферы и является одним из предвестников землетрясений [2, 3]. Это указывает на актуальность в его исследовании. Целью в настоящей работе является разработка нестационарной модели переноса с постоянными коэффициентами радона в системе грунт-атмосфера и получение ее аналитического решения, которое позволит получить некоторое представление о закономерностях распространения концентрации радона в грунте и атмосфере, как по времени, так и по пространству.

Постановка задачи. Согласно теории эманационного метода в радиометрической разведке перенос радона из пористого однородного грунта к земной поверхности осуществляется с помощью механизмов диффузии и конвекции [4]. В работе мы будем вместо конвекции рассматривать адвекцию – перенос, который может включать в себя либо конвекцию, либо фильтрацию. Будем считать характеристики переноса постоянными заданными величинами. Тогда задача нестационарного переноса радона в системе грунт-атмосфера может быть представлена в виде (ось z направлена вниз, $t > 0$):

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D_g \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial z^2} + v_g \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} - \lambda (A(z,t) - A_\infty), z > 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial z^2} + v_a \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} - \lambda A(z,t), z < 0$$

$$D_g \left. \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0+0} + v_g A(z,t) \Big|_{z=0+0} = D_a \left. \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0-0} + v_a A(z,t) \Big|_{z=0-0}$$