Інформаційні технології в біологічних системах

УДК 537.874.7

Ю.Е. Мегель[1], Н.В. Полянова[1], В.Е. Новиков[2], А.В. Артюшенко[3]

[1] *Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Харьков*
[2] *Институт электрофизики и радиационных технологий НАНУ, Харьков*
[3] *НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков*

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье рассматриваются алгоритмы и программы, позволяющие определить отклик биосистемы на последовательность электромагнитных импульсов.

Ключевые слова: *биологические системы, электромагнитная диагностика, метод адаптивного тестирования.*

Введение

Успешное применение электромагнитной терапии затруднено без эффективных методов диагностики изменения состояния биосистем под воздействием электромагнитных сигналов. В работе для целей оперативной диагностики и осуществления обратной связи при терапии предлагается использование метода адаптивного тестирования, который изначально был создан как средство получения динамических параметров сложных электронных устройств, находящихся под воздействием сигналов короткой длительности [1].

Методы, алгоритмы и программы, разработанные при анализе сложных радиофизических устройств, позволяют эффективно обрабатывать экспериментальные временные ряды и получать зависимость от времени для параметров, определяющих сложность и структуру экспериментальных последовательностей и для биологических объектов в условиях применения электромагнитной терапии.

Структура набора алгоритмов, осуществляющих методы диагностики, изображена на рис. 1.

Основными частями программного комплекса, существенными как для определения областей стационарности временных рядов, так и для осуществления хаотической связи, являются алгоритмы регуляризации временных рядов и алгоритмы определения информационной метрики. Эти алгоритмы представлены ниже.

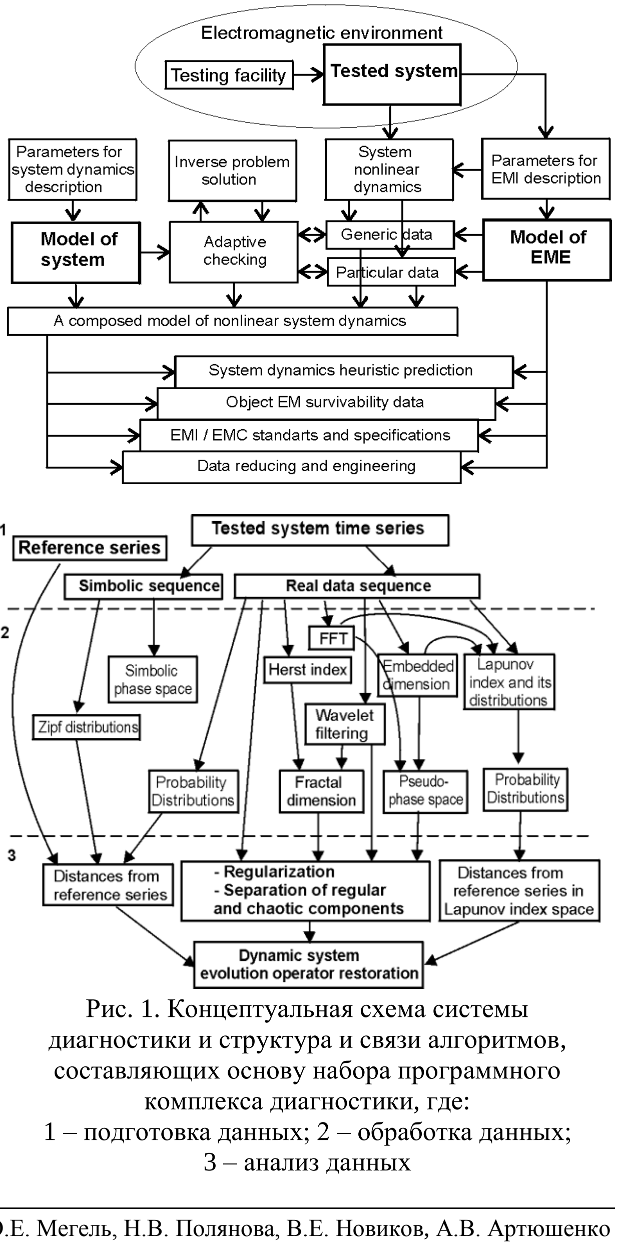


Рис. 1. Концептуальная схема системы диагностики и структура и связи алгоритмов, составляющих основу набора программного комплекса диагностики, где:
1 – подготовка данных; 2 – обработка данных;
3 – анализ данных

Регуляризирующие свойства дробных производных

Пусть $x(t)$ - реальный процесс, который происходит в исследуемой физической системе.

Этому физическому процессу соответствует второй процесс $y(t)$ – измеренный временной ряд, который отличается от $x(t)$, поскольку наблюдения производятся с погрешностями.

Пусть динамическая система имеет размерность вложения d_e и описывается обыкновенным дифференциальным уравнением степени d_e. Оператором, приводящим к наибольшей неустойчивости в таком уравнении, является оператор старшей производной. Поэтому мы будем конструировать регуляризирующий оператор, исходя из регуляризирующего оператора для оператора старшей производной. Рассмотрим для простоты уравнение $D^{de}y = z$. Некорректно поставленная задача, определения производной по временному ряду величины y, обычно записывается в форме интегрального уравнения $y = D^{-de}z$. Можно показать, что регуляризирующий оператор для оператора D^{-de} имеет форму [3] дробного интегро-дифференциального оператора $R^{\alpha} = D^{d_e-\alpha}$ порядка $d_e - \alpha$.

Регуляризирующий оператор играет роль обратного оператора в уравнении динамической системы. Другими словами, в нашем случае член эволюционного уравнения со старшей производной должен быть заменен на R^{α} (для получения устойчивого и единственного решения в результате специального сглаживания исходного ряда). Однако порядок дифференциального уравнения (оператора) может быть сохранен, если мы введем новые сглаженные переменные с использованием регуляризирующего оператора:

$$D^{d_e-\alpha}y = D^{d_e}z(t),\ z(t) = R_f^{\alpha}y(t);\ R_f^{\alpha} = D^{-\alpha}. \quad (1)$$

Интегральный оператор сглаживания переменных R_f^{α} преобразует неустойчивое решение динамической системы в устойчивое наблюдаемое состояние. Регуляризирующий параметр должен, естественно, удовлетворять следующему условию: если размерность аттрактора не дробная, а целая, то регуляризирующий параметр должен быть равен нулю. Выбор $\alpha = \{d_f\}$ удовлетворяет этому условию. Здесь $\{z\}$ – дробная часть z, а d_f – любая размерностная характеристика степени хаотичности траектории и неустойчивости относительно возмущения начальных условий. Это могут быть ляпуновская размерность траектории, корреляционная размерность и др.

Продемонстрируем действие алгоритмов регуляризации на модельном нестационарном временном ряду (рис. 2), представляющих собой функцию Вейерштрасса W с изменяющейся со временем корреляционной размерностью

$$W(D_f(t), t) = \sum_n b^{n(D_f(t)-2)}Cos(b^n t). \quad (2)$$

Ряд получен при изменении размерности от $D_f = 1{,}33$ в начале ряда через $D_f = 1{,}43$ в середине до $D_f = 1{,}33$ в конце временного ряда.

На рис. 3 показана траектория в фазовом пространстве.

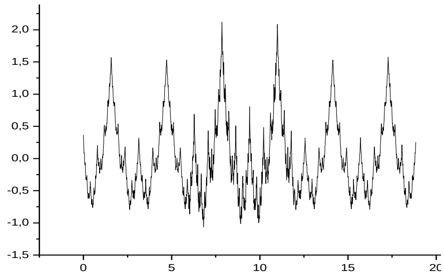
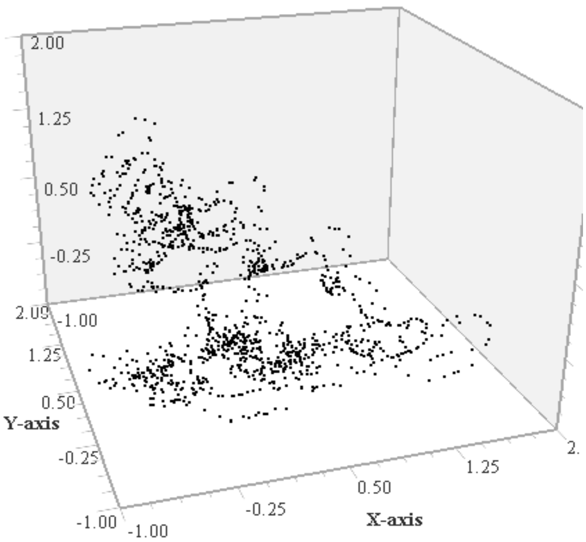
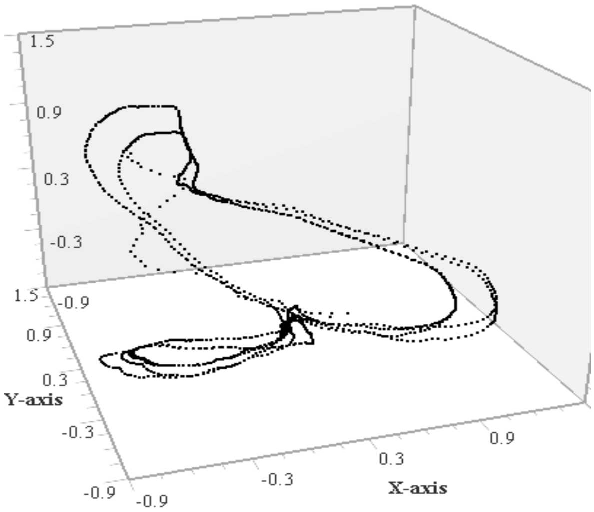


Рис. 2. График функции Вейерштрасса
с изменяющейся со временем размерностью
от $D_f = 1{,}33$ в начале ряда через $D_f = 1{,}43$
в середине до $D_f = 1{,}33$ в конце временного ряда



а



б

Рис. 3. Траектория в фазовом пространстве
для временного ряда рис. 2, где:
а – исходная траектория;
б – регуляризированная траектория

На рис. 3, а – траектория в фазовом пространстве, полученная с помощью обычной процедуры Такенса, а на рис. 3, б – фазовая траектория, которая получена в результате дифференцирования временного ряда с помощью предварительного сглаживания с помощью дробного интегрального оператора.

Видно, что процедура регуляризации позволяет выделить квазистационарные состояния. Для явного определения границ стационарности используется псевдометрика.

Информационные расстояния и определение нестационарности временных рядов

В работе [2], используя метод n-туплевого анализа Ципфа, была исследована статистическая структура бинарных последовательностей с короткими (экспоненциальными) марковскими и дальними корреляциями. Суть этого метода состоит в определении нормированной частоты появления $\omega(R)$ данного "слова" – бинарной комбинации длины n в зависимости от его ранга R. Ранг R определялся как номер слова в упорядоченном по убыванию частоты $\omega(R)$ множестве всех возможных слов длины n (их число $N = 2^n$), так что R = 1 соответствует наиболее встречаемому, R =2 - следующему по частоте и т.д.

Было обнаружено, что в случае длинно-коррелированных последовательностей в широком диапазоне значений R (за исключением значений, близких к граничным R = 1 и R = 2^n) гистограмма частоты $\omega(R)$ убывает с ростом ранга R приблизительно по степенному закону:

$$\omega(R) = A/(B+R)^{\xi}, \ \omega \approx R^{-\xi}, \tag{3}$$

где ξ получила название показателя Ципфа.

Показатель ξ может быть оценен из анализа экспериментальных данных как коэффициент наклона гистограммы Ципфа (график $\omega = \omega(R)$, выполненный в двойном логарифмическом масштабе).

Была обнаружена простая, приблизительно линейная, зависимость между показателем, характеризующим дальние корреляции, и показателем Ципфа ξ [2]. На рис. 4, а изображена функция распределения Ципфа-Мандельброта для реализации значений тока на конце линии (рис. 3).

Важность использования этих распределений для нашего исследования состоит в том, что эти распределения очень устойчивы к шумам. Параметры распределения Ципфа уверенно восстанавливаются при превышении амплитуды шума над уровнем сигнала в два раза. Кроме того, статистические распределения могут быть эффективно использованы в качестве основы для определения псевдометрики [4].

Расстояние между временными рядами $y_1(i)$ и $y_2(i)$ в настоящей работе определяется с помощью соотношения:

$$d_s = \sum_i \left(h^{1/2}\left(\omega_{y_1}(i)\right) - h^{1/2}\left(\omega_{y_2}(i)\right)\right)^2, \tag{4}$$

где $\omega_{y_1}(i)$ – функции распределения Ципфа-Мандельброта временного ряда;

$$h(x) = -x^q \ln_q(x).$$

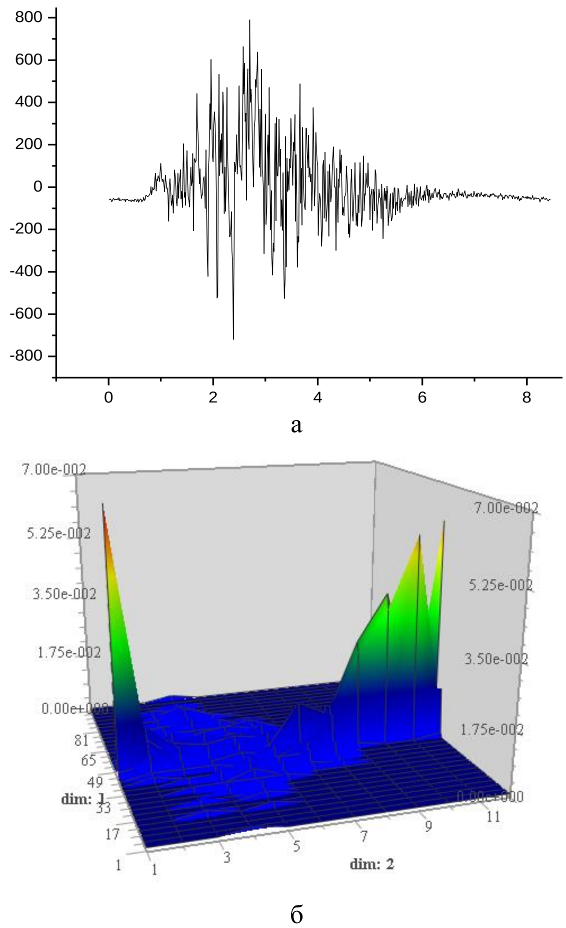


Рис. 4. Пример применения алгоритмов ATDP Suite для определения областей стационарности в экспериментальном временном ряду, где:
а – отклик объекта электромагнитный импульс;
б – эволюция функции распределения временного ряда

Здесь использовано обобщение энтропии, предложенное Тсаллисом (см., например, [5]), которое содержит вместо логарифма его степенное обобщение:

$$\ln(x) \to \ln_q(x) = \frac{x^{1-q} - 1}{1-q} \tag{5}$$

с неким числовым параметром q. Заметим, что при $q \to 1$, $\ln_q(x)$ переходит в настоящий логарифм.

Новая формула для q-энтропии выглядит так:

$$S_q = -\sum_i p_i^q \ln_q(p_i) = \frac{1-\sum_i p_i^q}{q-1}. \qquad (6)$$

Свойством q-энтропии, существенным для использования в диагностике, является то, что в то время, как обычная энтропия (при условии ее максимума) приводит к равновесной функции распределения, условие максимума q-энтропии приводит к степенному распределению Тсаллиса, подобного распределению Ципфа-Мандельброта.

На рис. 4, а показан отклик приемно-усилительного тракта с рабочей частотой 3 ГГц на импульсное электромагнитное воздействие длительностью в 1 наносекунду.

На рис. 4, б показана поверхность, представляющая эволюцию во времени функции распределения значений временного ряда. Уже из этого рисунка видны три области с принципиально разным характером функции распределения.

На рис. 5 показана динамика информационного расстояния временного ряда до тестовой последовательности с размерностью D_f = 1,96.

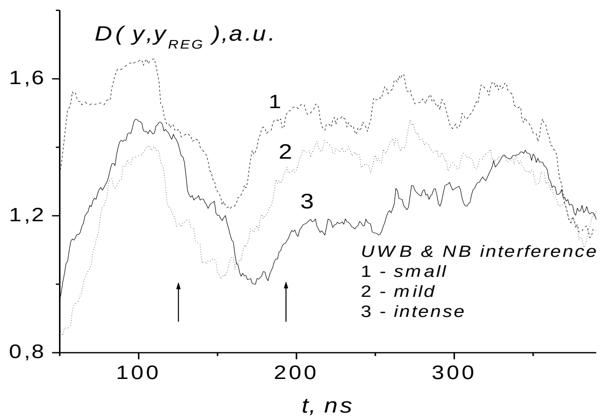


Рис. 5. Динамика расстояний между системой при сложном воздействии на нее и системой в нормальном состоянии (стрелки показывают моменты качественного изменения состояния системы)

Выводы

Метод адаптивного тестирования развивался как средство получения динамических параметров биологических систем, находящихся под воздействием электромагнитных сигналов.

Разработаны методы, алгоритмы и программы, позволяющие эффективно обрабатывать экспериментальные временные ряды.

Основу алгоритмов составляют метрики, построенные на функциях распределения значений и текущих показателей Ляпунова временного ряда.

Разработанные алгоритмы позволяют получать зависимость от времени параметров, определяющих сложность экспериментальных откликов биосистемы на последовательность электромагнитных импульсов.

Выделяются интервалы времени, в которых биосистема находится в квазистационарных состояниях, характеристики этих квазистационарных состояний и переходы между ними.

Список литературы

1. И.И. Магда, В.И. Чумаков, Н.П. Гадецкий, К.А. Кравцов, Ю.В. Прокопенко, Г.В. Скачек, Ю.В. Ткач. – AMEREM'96, Альбукерке, США, 1996. – P. 79.

2. Denisov S. Phys. Lett. A 235. – 1997. – P. 447.

3. Tang X.Z. Reconstruction of chaotic signals using symbolic data / X.Z. Tang, E.R. Tracy, B. Reggie // Phys. Letters, A 190. – No 8. – 1994. – P. 393-398.

4. Болотов В.Н. Проблемы классификации аттракторов и псевдометрика / В.Н. Болотов, С.В. Денисов, В.Е. Новиков // Труды 7-й Межд. конф. КрыМиКо'97. – Севастополь, Украина, 1997. – С. 252.

5. Tsallis C. Nonextensive statistics / C. Tsallis // Brazilian Journal of Physics. – 1999. – Vol. 29. – P. 1-35.

Поступила в редколлегию 20.08.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Д. Черенков, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков.

ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ДІАГНОСТИКИ СТАНІВ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Ю.Є. Мегель, Н.В. Полянова, В.Є. Новіков, О.В. Артюшенко

У статті розглядаються алгоритми і програми, що дозволяють визначити відгук біосистеми на послідовність електромагнітних імпульсів.

Ключові слова: *біологічні системи, електромагнітна діагностика, метод адаптивного тестування.*

TECHNOLOGY OF ELECTROMAGNETIC DIAGNOSTICS OF THE STATES OF THE BIOLOGICAL SYSTEMS

Yu.Ye. Megel, N.V. Polyanova, V.Ye. Novikov, A.V. Artyushenko

Algorithms and programs allowing to define the response of the biological system on electromagnetic impulses are examined in the article.

Keywords: *biological systems, electromagnetic diagnostics, method of the adaptive testing.*