

# Інформаційні технології в біологічних системах

УДК 537.874.7

Ю.Е. Мегель<sup>1</sup>, Н.В. Полянова<sup>1</sup>, В.Е. Новиков<sup>2</sup>, А.В. Артюшенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Харьковський національний технічний університет сільськогосподарського господарства імені Петра Василенка, Харків

<sup>2</sup> Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАНУ, Харків

<sup>3</sup> НТУ «Харківський політехнічний інститут», Харків

## 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.

### Регуляризирующие свойства дробных производных

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

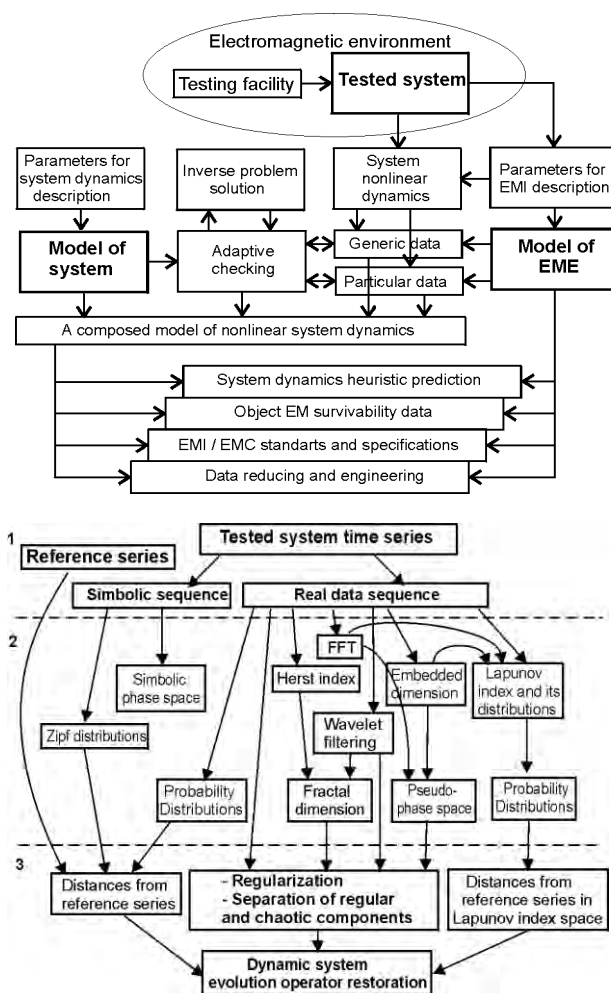


Рис. 1. Концептуальная схема системы диагностики и структура и связи алгоритмов, составляющих основу набора программного комплекса диагностики, где:  
1 – подготовка данных; 2 – обработка данных;  
3 – анализ данных

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  $D^{d_e}y = z$ . Некорректно поставленная задача, определения производной по временному ряду величины  $y$ , обычно записывается в форме интегрального уравнения  $y = D^{-d_e}z$ . Можно показать, что регуляризирующий оператор для оператора  $D^{-d_e}$  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  $R^\alpha$  (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:

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

Интегральный оператор сглаживания переменных  $R_f^\alpha$  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

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

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.

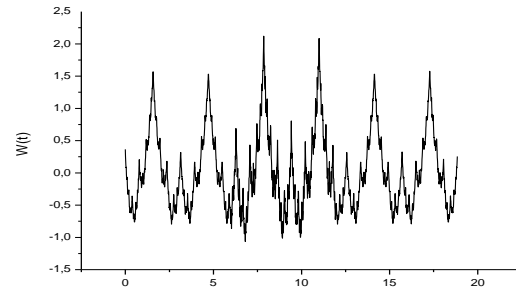
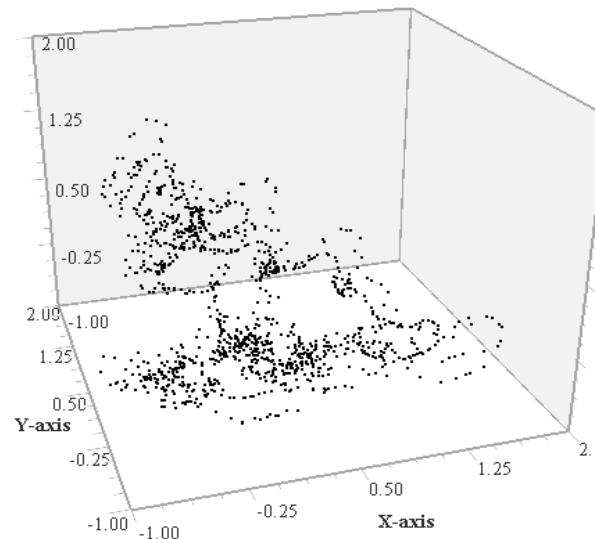
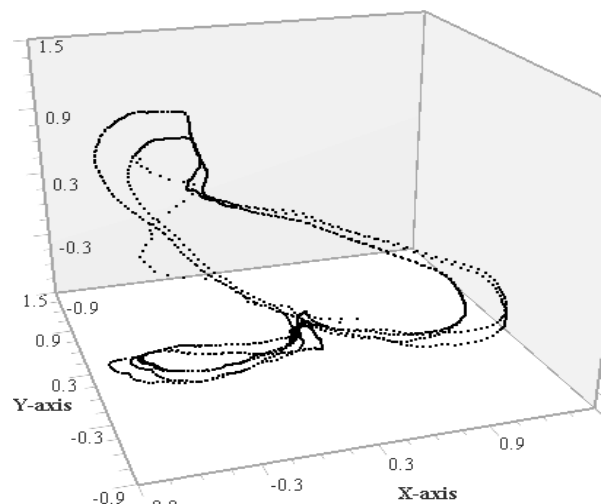


Рис. 2. График функции Вейерштрасса с изменяющейся со временем размерностью от  $D_f = 1,33$  в начале ряда через  $D_f = 1,43$  в середине до  $D_f = 1,33$  в конце временного ряда



а



б

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

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

где  $\xi$  получила название показателя Ципфа.

Показатель  $\xi$  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  $\xi$  [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:

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

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

$$h(x) = -x^q \ln_q(x). \quad \text{WB}_3$$

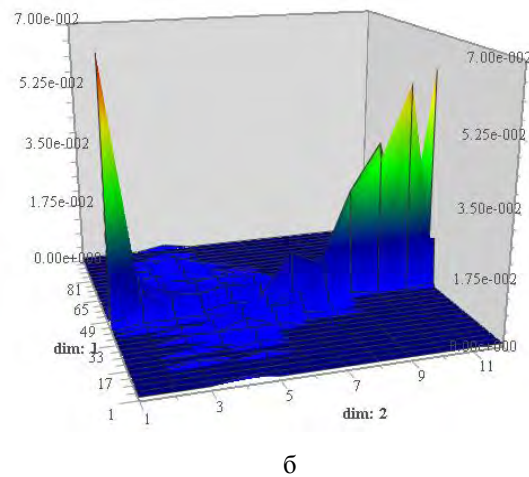
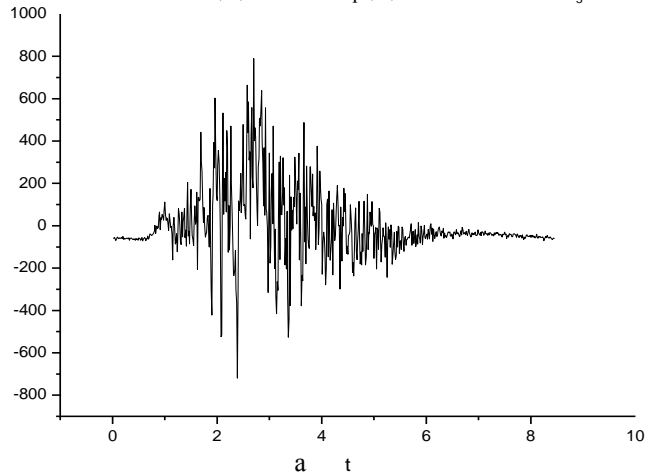


Рис. 4. Пример применения алгоритмов ATDP Suite для определения областей стационарности в экспериментальном временном ряду, где: а – отклик объекта электромагнитный импульс; б – эволюция функции распределения временного ряда

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

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

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

Новая формула для q-энтропии выглядит так:

**Выводы**

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

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  $D_f = 1,96$ .

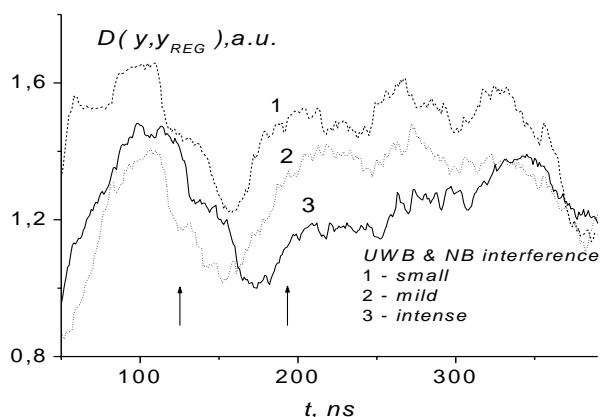


Рис. 5. Динамика расстояний между системой при сложном воздействии на нее и системой в нормальном состоянии (стрелки показывают моменты качественного изменения состояния системы)

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. – АМЕРЕМ'96, Альбукерке, США, 1996. – Р. 79.
2. Denisov S. *Phys. Lett. A* 235. – 1997. – Р. 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. – Р. 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. КрыМуКо'97. – Севастополь, Украина, 1997. – С. 252.*
5. Tsallis C. *Nonextensive statistics* / C. Tsallis // *Brazilian Journal of Physics.* – 1999. – Vol. 29. – Р. 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.