

**Солдатов Геннадий Валерьевич**

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: g.soldatov@gmail.com.

347900, г. Таганрог, пер. Некрасовский, д. 17, кв. 338.

Тел.: +79185886600.

Ведущий электроник.

**Soldatov Gennady Valerevich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: g.soldatov@gmail.com.

17, Nekrasovsky, Apt. 338, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +79185886600.

Electronic.

УДК 534.222

**И.Б. Старченко**

**МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ГИДРОСФЕРЫ  
ПРИ ПОМОЩИ НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭВОЛЮЦИИ  
ИСКАЖЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ\***

*Рассматриваются методы нелинейной хаотической динамики сложных систем применительно к гидроакустическому сигналу, излученному в реальную морскую среду, прошедшему в ней определённое расстояние и претерпевшему ряд искажений формы, спектрального состава и др. Определены такие нелинейные инварианты как фазовый портрет (аттрактор), максимальный показатель Ляпунова, рекуррентные графики, корреляционная размерность, внедренная размерность. Проведены дополнительные вычисления функции взаимной информации и ближайших ложных соседей. Показано, что в рассматриваемом случае, среда добавляет две степени свободы к исходному сигналу, что нужно учитывать при проектировании устройств обработки информации.*

*Искажение сигнала; степень свободы; хаотическая система.*

**I.B. Starchenko**

**MONITORING AND FORECASTING OF HYDROSPHERE CONDITION  
WITH NON-LINEAR ANALYSIS OF THE DISTORTION'S EVOLUTION  
OF ACOUSTIC SIGNALS IN-SITU**

*This article deals with methods of nonlinear chaotic dynamics of complex systems applied to sonar signals emitted into the real marine environment, passed in it certain distance and has undergone a number of distortions of shape, spectral composition, etc. Such invariants of nonlinear dynamics as phase portrait (attractor), the maximum Lyapunov exponent, recurrence plots, correlation dimension, embedded dimension were defined. Additional calculations of the function of mutual information and false nearest neighbors were performed. It is shown that in the given case, the medium of propagation adds two degrees of freedom to the initial signal that must be considered when designing processing devices.*

*Signal distortion; degree of freedom; chaotic system.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК №П1148 от 03.06.2010).

Когда непрерывный сигнал распространяется в натуральных условиях, его синусоидальный характер искажается. Это искажение вызывается множеством степеней свободы в морской среде. Исследовались частотно-временные характеристики распространения ЛЧМ-импульсов длительностью 2 мс с заполнением, частота которого имела линейную модуляцию в полосе 5–20 кГц. Антенна располагалась на глубине 1,5–1,7 м и ось излучения ориентирована горизонтально. Глубина места в районе экспериментов 2,5–3 м. С выхода приемно-усилительного тракта сигналы подаются через аналого-цифровой преобразователь на ПК и записываются на носитель. Схема проведения опыта показана на рис. 1. Расстояния между антеннами – до 5,6 км [1].

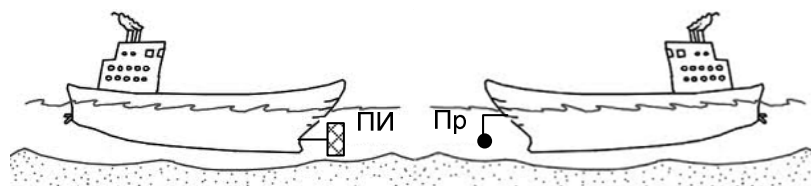


Рис. 1. Геометрия эксперимента

На рис. 2 показаны сформированный сигнал на выходе из излучателя (рис. 2,а) и после распространения в воде на приемном гидрофоне (дистанция – 1 км) (рис. 2,б), а также спектральные представления этих сигналов (спектр мощности, спектрограмма, а также масштабированное частотно-временное распределение с использованием вейвлетов Морле). Сравнение изображений сигнала показывает, что ЛЧМ-сигнал претерпевает значительные изменения как формы, так и спектрального состава, вызванные неоднородностью, нелинейностью и диссипацией в природной среде распространения.

Целью исследования являлось определение количества степеней свободы, которые добавляются к искусственному сигналу в реальной среде. Для этого использовались методы изучения хаотических систем для анализа скалярных рядов данных.

Теоремы Мане [2], Такенса [3] и Пакарда [4] являются основой анализа многомерных данных, основанных на одном скалярном временном ряде. Используя эти теоремы, сигнал представляют как геометрический объект – аттрактор. Аттрактор существует в евклидовом пространстве, которое определяется как пространство состояний. Обычно используется термин «фазовое пространство», но, чтобы не путать с фазой сигнала, используется термин «пространство состояний». Из геометрических свойств аттрактора получают отличительные характеристики сигнала и скорость потери информации с эволюцией сигнала.

Трансформация из скалярного временного ряда в пространство состояний состоит в формировании векторов из измеренных амплитуд напряжений:

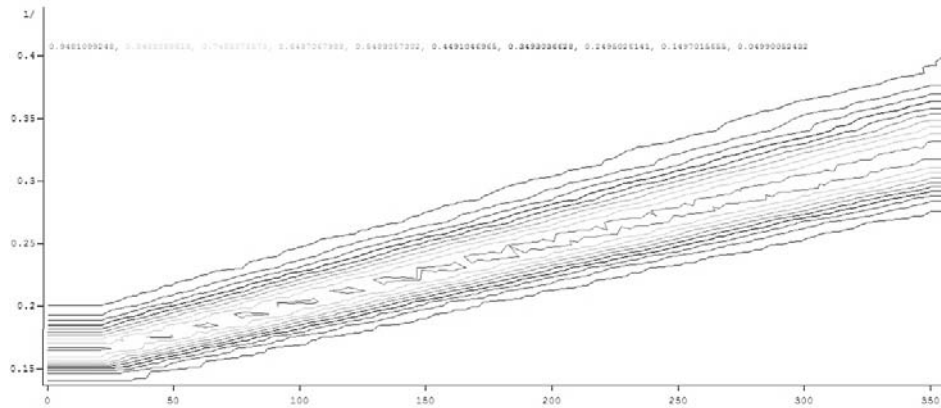
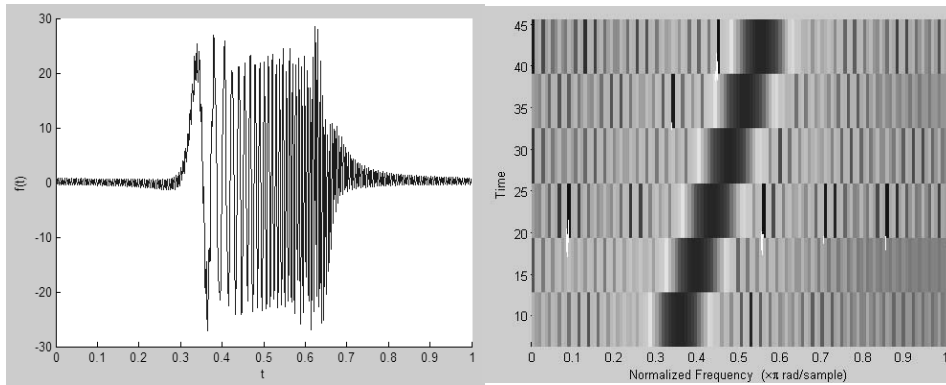
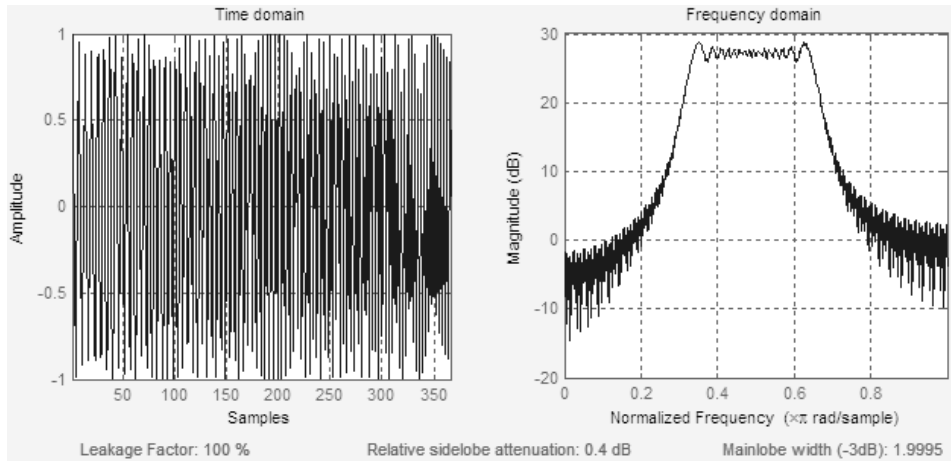
$$v(n) = v(t_0 + nt_s) \quad y(n) = [v(n), v(n+T), v(n+2T), \dots, v(n+(d-1)T)] \quad (1)$$

Эти векторы затем изображаются в евклидовом пространстве размерности  $d$ . Чтобы это проделать, нужно выбрать подходящую временную задержку  $T$  и размерность  $d$ , необходимую для внедрения данных.

Усредненная взаимная информация, определенная Шенноном [5] является мерой того, сколько информации можно получить о будущем системы из текущих данных. Усредненная взаимная информация является мерой общей зависимости и

некоторым образом связана с корреляционными функциями и автокорреляцией. Усредненная взаимная информация в двумерном случае определяется через объединенные вероятности двух наборов данных, усредненные по всем наблюдениям:

$$I_{AB}(T) = \sum P_{A,B}(a,b) \log_2 \left[ \frac{P_{A,B}(a,b)}{P_A(a)P_B(b)} \right]. \quad (2)$$



a

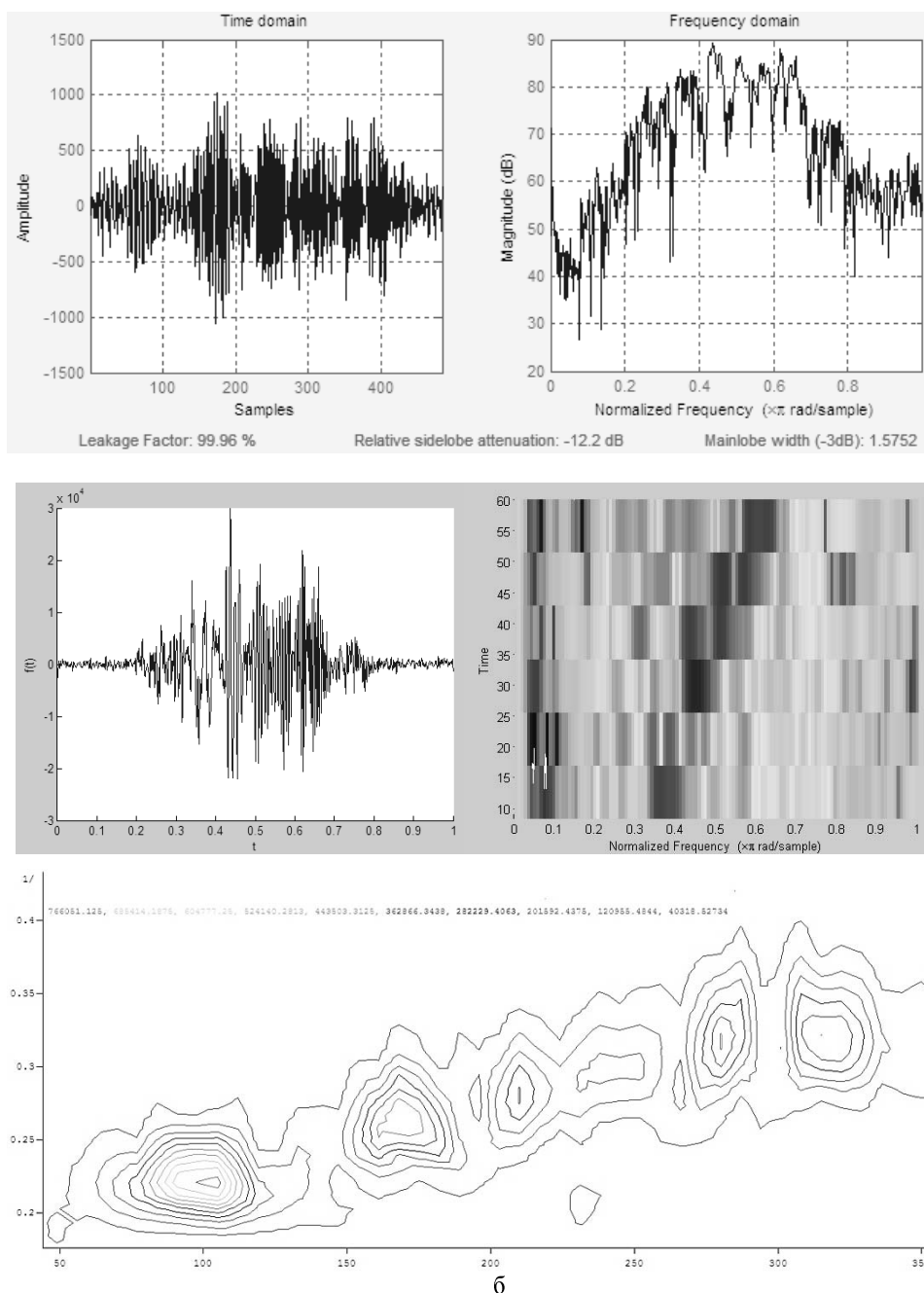


Рис. 2. ЛЧМ-сигнал: а – на выходе излучателя; б – в морской среде

Если  $a$  и  $b$  (или в данном случае  $v(n)$  и  $v(n+T)$ ) независимы, то  $P(a,b) = P(a)P(b)$ , и все члены при суммировании пропадают. Так как хаотические системы имеют положительную энтропию по Шеннону, то ожидается, что для больших  $T$  измерения будут независимы. Если  $T$  слишком велико, то  $v(n)$  и

$v(n+T)$  будут произвольными друг для друга в хаотической системе. Если  $T$  слишком мало, то каждый последующий ряд будет содержать мало новой информации. Требуется найти промежуточное значение  $T$ , для которого  $I(T)$  будет не велико и не мало.

В [6] предложено в качестве оптимума для времени задержки при реконструкции в фазовом пространстве использовать первый локальный минимум  $I(T)$ . В действительности  $T$  может быть произвольным для бесконечного набора данных в отсутствие шума. Качество фазового портрета в пространстве состояний зависит от  $T$ , поэтому желательно выбрать некоторые обоснованные значения. Определение времени задержки  $T$  важно, так как оптимальный выбор  $T$  даст наилучшее разделение соседних траекторий при минимальном внедренном пространстве. Это будет также важно впоследствии при вычислении экспонент Ляпунова, которое опирается на решение матрицы, которая составлена из описаний того, как близкие траектории расходятся. Если траектории не разделяются, то матрица будет плохо согласованной и может оказаться неразрешимой.

На рис. 2 показана функция  $I(T)$  для исследуемых сигналов для времен задержек от 0 до 20 ( $4,3 \cdot 10^{-4}$  с). Размерность  $I(T)$  – количество битов, требуемых для полного описания возможных значений сигнала с разрешением, которое задается использованным количеством выборок. Для 3500 выборок, использованных для получения рис. 3, требуется 10 бит (количество бит =  $\log_2$  (количество выборок – 1)). Таким образом,  $I(T)$  – это число битов, которое может быть предсказано во время  $T$ , если полностью известно состояние системы во время  $T = 0$ . Оптимальное время задержки ( $T_{opt}$ ) равно 2 ( $4,3 \cdot 10^{-5}$  с), оно располагается на хорошо выраженном локальном минимуме. Уменьшение пиковых значений говорит о потере временной когерентности сигнала во времени.

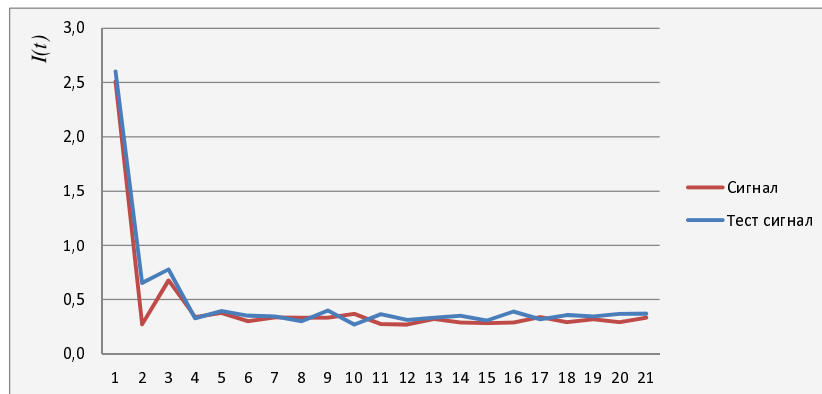


Рис. 3. Функция взаимной информации

Рекуррентные графики – диагностический инструмент, разработанный в 1987 г. Экманом, Кампхорстом и Рюэллем, не накладывают существенных ограничений на данные, а потому позволяют работать практически с любыми рядами. Более того, зачастую системы обладают многомерными фазовыми траекториями, что делает возможным изображать только проекции таких траекторий в двух- или трёхмерных подпространствах. Пусть точка  $x(i)$  соответствует  $i$ -й точке фазовой траектории, описывающей выбранную динамическую систему в  $m$ -мерном пространстве,

для  $i=1, \dots, N$ , тогда рекуррентный график есть массив точек  $N \times N$ , где ненулевой элемент с координатами  $(i, j)$  соответствует случаю, когда  $x(i)$  достаточно близко к  $x(j)$ . Рекуррентность состояния в момент  $i$  при различных значениях времени  $j$  воспроизводится внутри двумерной квадратной матрицы с чёрными и белыми точками, где чёрные точки обозначают наличие рекуррентности, а по обеим осям откладывается время. Такое представление и называется рекуррентным графиком. Математически это может быть выражено следующим образом:

$$R_{i,j} = \Theta(r_i - \|x_i - x_j\|) \quad \bar{x}(i) \in R^m, \quad (3)$$

где  $i, j=1, \dots, N$ ,  $N$  – число рассматриваемых состояний  $x_i$ ,  $r_i$  – граничное расстояние или расстояние от центра выбранной окрестности (точка  $x(i)$ ) до ее границы,  $\|\cdot\|$  – норма, и  $\Theta$  – функция Хевисайда.

Наличие диагональных структур на рис. 4,а, соответствующего рекуррентному графику исходного сигнала, говорит о детерминированности процесса, в то же время на рис. 4,б наблюдаются неравномерные скопления точек, что говорит о хаотичности процесса, описываемого сигналом, прошедшим определенное расстояние в морской среде.

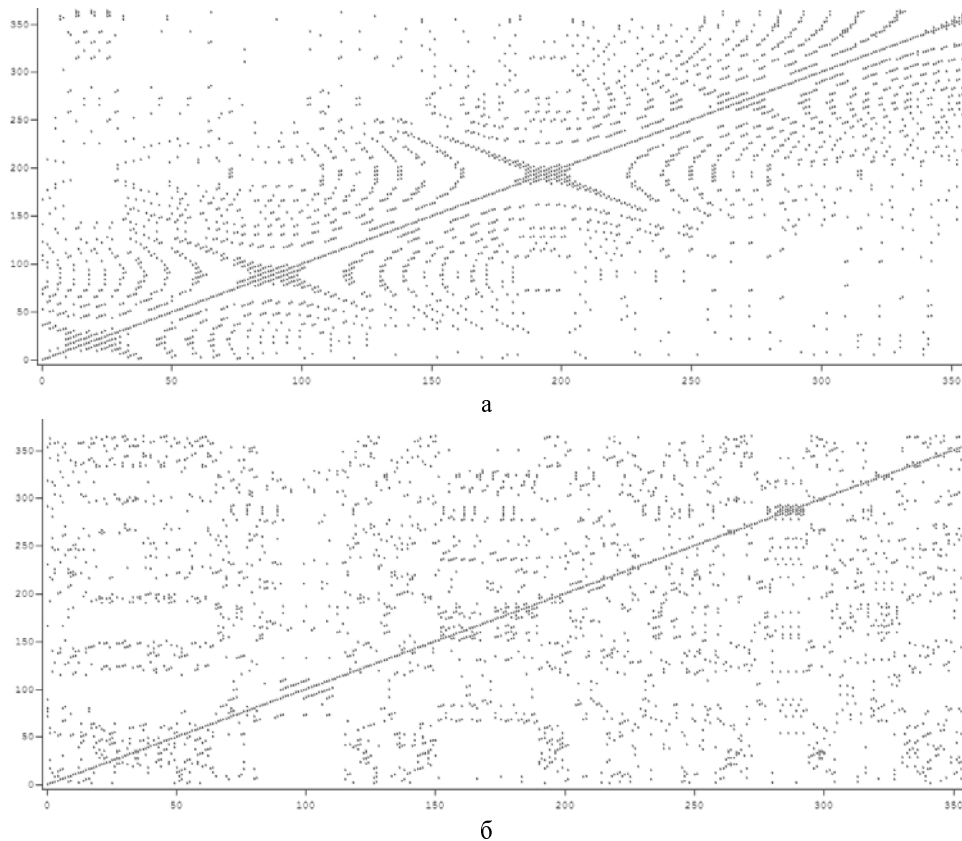


Рис. 4. Рекуррентные графики: а – на выходе излучателя; б – в морской среде

Определение  $T_{opt}$  является одним из двух параметров, необходимых для реконструкции аттрактора. Второй – величина внедренной размерности.

Геометрический базис для определения подходящего числа размерностей для реконструкции аттрактора, разработанный в [7], опирается на то факт, что когда к пространству состояний добавляются координаты, то аттрактор становится раскрытым. Когда используется достаточное количество координат, то все точки на аттракторе лежат одна возле другой в силу динамики системы, а не в проекции высших размерностей.

Глобальная внедренная размерность важна, так как она определяет количество степеней свободы, необходимое для полного описания поведения системы.

Процедурно для размерности  $d$  определяются ближайшие окрестности  $y(n)$

$$y^{NN}(n) = [v^{NN}(n), v^{NN}(n+t), \dots, v^{NN}(n+d-1)T]. \quad (4)$$

К  $y(n)$  добавляется компонента  $v(n+dT)$  и к  $y^{NN}(n)$  добавляется  $v^{NN}(n+dT)$ . Если расстояние между этими ближайшими окрестностями остается малым, то они считаются истинными и близкими в силу динамики системы. Если расстояние большое, это значит, что окрестности кажутся близкими из-за проекции высшей размерности на низшую. При достаточном количестве размерностей число ложных окрестностей падает до нуля и аттрактор раскрывается.

На рис. 5 показан процент ближайших ложных окрестностей (соседей) для исследуемых сигналов сигнала. С практической точки зрения, если процент ближайших соседей ниже 30 %, то минимум внедренной размерности достигнут. В данном случае  $d_E = 4$  (красная линия, а). Сравните результат с расчетом для излученного сигнала (рис. 4), который подтверждает то, что *apriori* известно, что требуется только два измерения, как показано на рис. 4 (зеленая линия, б). Число степеней свободы сигнала было определено исключительно из одиночного временного ряда. Для этой методики не требуется знания физики процесса.

Так как алгоритм ближайших ложных соседей набирает статистику по большому числу окрестностей, то он относительно устойчив к шуму и искажениям от высших размерностей. Если данные зашумлены или искажены, то минимальный процент возрастет (он не будет равен нулю) из-за более высокого процента окрестностей, которые ложно близки из-за размытия аттрактора. На более высокой размерности большинство этих точек будут располагаться отдельно, давая впечатление, что они ложные. Это можно скомпенсировать, увеличивая расстояние смещения векторов, при котором они будут считаться ложными.

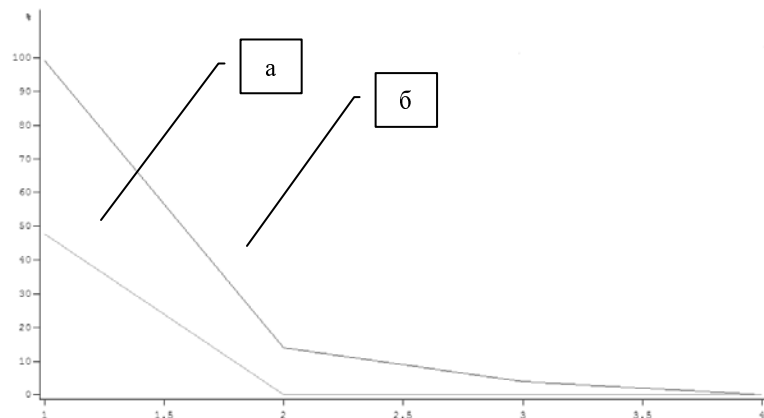


Рис. 4. Глобальная внедренная размерность для ЛЧМ-сигнала:  
а – на выходе излучателя; б – в морской среде

На рис. 6 показана проекция аттрактора в псевдо-трехмерном пространстве. Важные характерные особенности аттрактора разделены. Излученный сигнал имеет преобладающую орбиту. Искажения смазывают наличие преобладающей орбиты и добавляют в аттрактор орбиты меньшего диаметра, соответствующие шумовым компонентам и гармоникам.

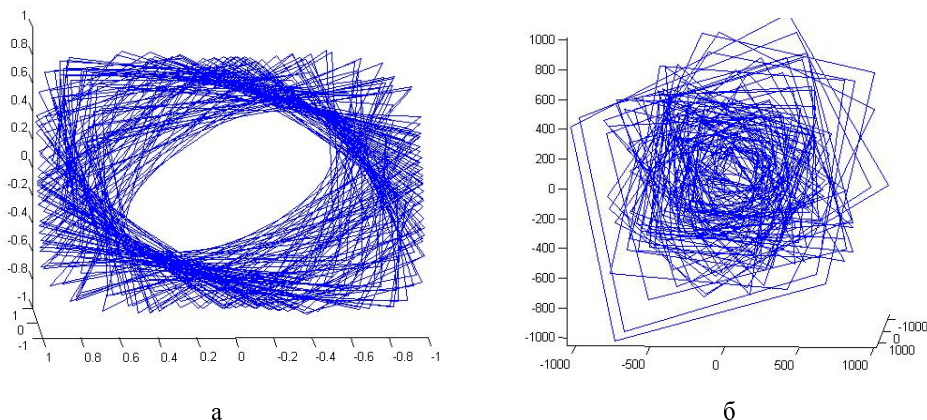


Рис. 6. Трехмерное представление аттрактора исследуемых сигналов:  
а – на выходе излучателя; б – в морской среде

Фрактальная размерность аттрактора  $d_A$  дает информацию о том, как в фазовом пространстве располагается система. В одной из интерпретаций  $d_A$  показывает, сколько реальных степеней свободы имеется. В другой – фрактальная размерность устанавливает, как объем объекта соотносится с его размером:  $\text{объем} = \text{размер}^{d_A}$ . Фрактальная размерность аттрактора  $d_A$  может быть оценена с использованием приближения Рюэлла [9] и алгоритма Грассбергера–Прокаччия [10] путем вычисления количества сфер или кубиков  $N(r)$  размера  $r$ , которые захватывают все точки при  $r$  стремящемся к нулю

$$d_A \approx \frac{\log(N(r))}{\log(1/r)} \text{ при } r \rightarrow 0. \quad (5)$$

На рис. 7 показана оценка  $d_A$ , как функция расстояний между точками аттрактора  $r$ . Точная оценка этих данных не может быть выполнена из-за их искажений и зашумленности. Величина  $d_A$  увеличивается для сигнала, прошедшего определенное расстояние в среде. Это не удивительно, так как известно, что окружающий фоновый шум и возможные другие сигналы имеют много большие размерности. Следствием этого является ореол из окрестностей вокруг каждой выборки, который нарушает оценки расстояния. Несмотря на это данный сигнал не полностью заполняет пространство для внедренных размерностей больше 3. В общем случае это означает, что это детерминистский процесс, искаженный шумом.

Экспоненты Ляпунова являются мерой того, как быстро траектории очень близких точек в фазовом пространстве расходятся. Для каждой размерности существует одна экспонента. Если одна или более экспонент положительны, то система хаотична. Если все экспоненты Ляпунова равны нулю или отрицательны, то траектории не расходятся и система стабильна. Если одна или более экспонент Ляпунова положительны, то траектории расходятся и система нестабильна. Критерием хаоса является, по крайней мере, одна положительная экспонента Ляпунова [11]. Экспоненты Ляпунова инвариантны по отношению к начальным условиям, поэтому – это альтернативный способ определения хаотичности систем.



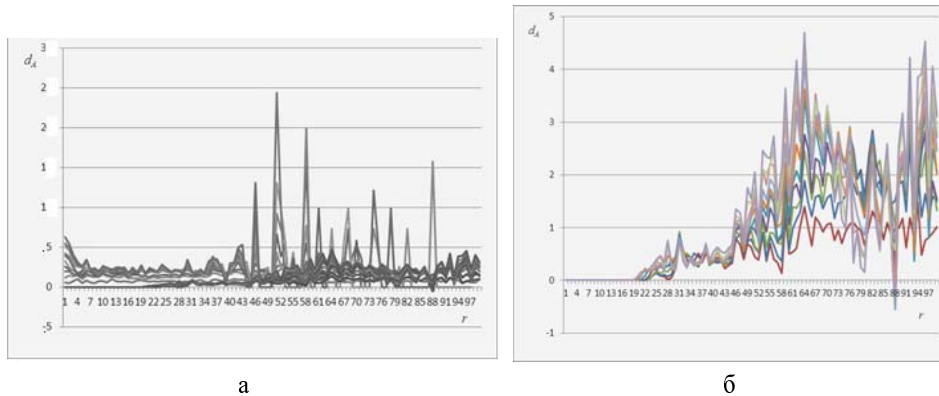


Рис. 7. Оценка корреляционной размерности: а – на выходе излучателя; б – в морской среде

Все экспоненты Ляпунова могут быть вычислены из якобиана отображения с использованием методики QR-декомпозиции. Одинаково важны взаимосвязь экспонент Ляпунова и возможность предсказания поведения системы. Чем больше экспонент корректно можно определить, тем точнее будут предсказания.

Экспоненты Ляпунова являются глобальным инвариантом, так как они описывают влияние бесконечно малых возмущений на бесконечном времени [12]. Локальные экспоненты Ляпунова измеряют расхождение траекторий в различных областях фазового пространства и для различных диапазонов предсказания  $L$ .

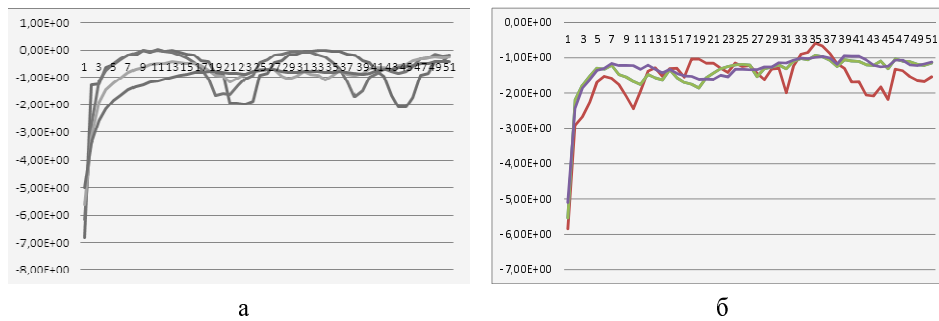


Рис. 8. Оценка максимальной экспоненты Ляпунова по Кантцу: а – на выходе излучателя; б – в морской среде

Однако шум мешает оценке якобианов. Влияние шума заключается в увеличении (в положительную область) экспонент Ляпунова. Таким образом, экспоненты, которые являются положительными, но имеют малые значения, становятся больше. Это имеет смысл, потому что траектории «отталкиваются в стороны» из-за шума.

Для рассмотренного в статье эксперимента искажения, вносимые реальной средой, добавляют две степени свободы к сигналу. Оценки размерностей совпадают друг с другом, за исключением отсутствия уверенности в вычислениях корреляционной размерности. Из данных нельзя прямо сказать, что вызывает искажения. Это могут быть многолучевые распространения, взаимодействия с дном и поверхностью, другие удаленные сигналы и вертикальный профиль скорости звука, гидрофизические неоднородности, вызванные загрязнениями и др.

Сигналы, зафиксированные в этом эксперименте, имеют четыре степени свободы. Проектирование фильтров для определения и ослабления искажений, вызываемых натурными условиями, следует производить с помощью алгоритмов, работающих с четырьмя степенями свободы.

Результаты основаны на одном наблюдении в одном местоположении в единый момент времени. Если провести исследования с множеством данных, собранных при различных условиях, то вероятно, что результаты будут коррелироваться по времени дня, расстоянию, географическому местоположению, времени года и глубине гидрофона. Также эксперименты могут прояснить, как искажения растут с расстоянием.

Низкие степени свободы, добавляемые окружающей средой (такие как многолучевое распространение, модовое распространение, дисперсия) могут быть ослаблены использованием методов снижения хаотического шума, таких как вероятностная фильтрация масштаба. Удаление искажений в адекватном пространстве, которое четырехмерно, как показано здесь, восстановит большую часть энергии, поглощенную системой. В общем случае, сила сигнала повышается при возвращении сигнала на его оригинальную орбиту в фазовом пространстве. Это может обеспечить более высокое подавление шума, в отличие от традиционных схем в данном случае искаженная энергия сигнала больше восстанавливается, чем подавляется.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гостев В.С., Есинов И.Б., Попов О.Е., Воронин В.А., Тарсаев С.П.* Дисперсия сигнала параметрической антенны в мелком море // *Нелинейные акустические системы. Сборник статей*, май, 2008. – Ростов-на-Дону: ЗАО «Ростиздат», 2008. – С. 27-37.
2. *Mañé R.* On the dimension of the compact invariant sets of certain nonlinear maps. In *Dynamical Systems and Turbulence / Edited by D. A. Rand and L.-S. Young.* – Berlin: Springer, 1981. – P. 230-242.
3. *Takens F.* Detecting strange attractors in turbulence / In *Dynamical Systems and Turbulence*, edited by D.A. Rand and L.-S. Young. – Berlin: Springer, 1981. – P. 366-381.
4. *Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S.* Geometry from a time series // *Phys. Rev. Lett.*, 1980. № 45 (9). – P. 712-716.
5. *Shannon C.E., Weaver W.* *The Mathematical Theory of Communication.* – Urbana: Univ. Illinois, 1949.
6. *Fraser A.M., Swinney H.L.* Independent coordinates for strange attractors from mutual information // *Phys. Rev.*, 1986. A 33. – P. 11-34.
7. *Kennel M.B., Brown R., Abarbanel H.D.I.* Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction // *Phys. Rev.* – 1992. A 45. – P. 3403.
8. *Abarbanel H.D.I., Kennel M.B.* Local False Nearest Neighbors and Dynamical Dimensions from Observed Chaotic Data // *Phys. Rev.*, 1993. – E 47. – P. 3057–3068.
9. *Ruelle D.* *Proc. R. Soc. London Ser.*, 1990. A 427. – №24.
10. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the Strangeness of Strange Attractors // *Physica*, 1983. D 9. – P. 189.
11. *Кузнецов С.П.* *Динамический хаос (курс лекций).* – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2001. – 296 с.
12. *Abarbanel H.D.I., Brown R., Kennel M.* Variation of Lyapunov Exponents on a Strange Attractor // *J. Nonlinear Sci.* – 1991. – № 1. – P. 175-199.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Г.В. Куповых.

#### **Старченко Ирина Борисовна**

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: star@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Starchenko Irina Borisovna**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: star@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

The Department Hydroacoustics and Medical Engineering; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

УДК 532.5.032

**С.В. Тарасов**

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖИТЕЛЯ БИОНИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ ПОДВОДНЫХ МИКРОРОБОТОВ**

*На основе обзора и анализа перспектив использования подводных микророботов бионического типа, делается вывод о необходимости корректного моделирования их пропульсивных характеристик.*

*Рассматривается проблема моделирования гидродинамических характеристик движителя, представляющего собой машущий упругий плавник, приводимый в движение элементом с эффектом памяти. Инструментом исследования является разработанный автором программный код «SmartFlow», осуществляющий расчет турбулентного течения несжимаемой жидкости на основе уравнений Навье–Стокса при помощи метода крупных вихрей.*

*Необитаемый подводный аппарат; подводный микроробот; машущий движитель; материал с памятью формы.*

**S.V. Tarasov**

### **COMPUTATIONAL MODELING OF BIOMIMETIC PROPULSOR FOR UNDERWATER MICRO ROBOTS**

*On the basis of review and analysis of perspectives of application of underwater micro robots, a conclusion is made about the necessity of reasonable modeling of their propulsive characteristics.*

*A problem of modeling of hydrodynamic characteristics of a biomimetic propulsor in the form of an elastic flapping fin, driven by a shape memory alloy is considered. The computations have been carried out with use of a software code SmartFlow developed earlier by the author, enabling computation of a turbulent incompressible flow on the basis of Navier–Stokes equations with use of large eddy simulation method.*

*Unmanned underwater vehicle; underwater microrobot; flapping propulsor; shape memory alloy.*

**Применение необитаемых подводных аппаратов.** Существует мнение, что автономные необитаемые подводные аппараты (НПА) – это технология, обеспечивающая завоевание лидирующего экономического положения в мире за счет повышения эффективности подводных работ. Специалистами отмечается ряд неоспоримых преимуществ использования автономных НПА – это более высокая производительность, простота эксплуатации, точность управления, простота транспортировки, меньшая стоимость и др.

В настоящей работе основное внимание уделяется категории малых мини- и микроаппаратов (АМПА). Несмотря на специфическую функциональность и ряд ограничений, следует отметить и преимущества «малых» аппаратов над «большими», которые заключаются в более высокой надежности и простоте конструкции, более легком обслуживании (спуск, подъем на борт, заряд аккумуляторов) и более низкой общей стоимости.