

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ХАОСА СИГНАЛОВ

А.А. Горшенков, Ю.Н. Кликушин

Описаны методы количественной оценки динамического и статического хаоса сигналов, основанные на технологиях идентификационных измерений.

Ключевые слова: идентификационные измерения, неупорядоченность, сигналы, хаос, шкалы распределений

Введение

В настоящее время можно выделить несколько подходов к оценке неупорядоченности сигналов, в которых понятия «неупорядоченность» и «хаос» считаются синонимами. Первый, информационный, подход основан на бриллюэновской концепции хаоса и связан с вычислением энтропии сигналов [1]. Второй, геометрический, подход использует теорию фракталов [2], как основу вычисления обобщенной размерности сигналов. Третий подход [3] основан на анализе свойств устойчивости замкнутых, динамических систем. Четвертый – лингвистический – подход предлагает рассматривать хаос, как нарушение первоначально упорядоченного списка некоторых эталонов данной предметной области. Так, например, если в русском алфавите с прямой последовательностью букв от А до Я, переставить местами только две любые буквы, то полученный список будет уже неупорядоченным. Самым простым способом количественной оценки степени неупорядоченности является сравнение списков по числу совпавших (несовпавших) имен эталонов.

Идея применить лингвистический подход к задачам классификации и распознавания сигналов была высказана в работе [4]. Следует отметить, что, если динамический хаос является следствием наличия движения, то лингвистический хаос можно отнести к хаосу положений и, таким образом, считать его характер статическим.

В данной работе рассматривается предложение о совместном измерении статического и динамического хаоса, что дает возможность представлять свойства исследуемых сигналов в векторной форме (например, в виде двумерной, или даже трехмерной, классификации).

Метод оценки динамического хаоса

Рассматриваемая методика оценки динамического хаоса основана на результатах идентификационных измерений периодических и случайных сигналов с помощью K -тестера [5]. Если на вход такого, идентифи-

кационного тестера подать выборочную реализацию некоторого сигнала $X(t)$, то на выходе получим число (параметр варибельности), физический смысл которого состоит в том, что оно является оценкой угловой скорости ω вращения вектора сигнала за время наблюдения $K = \omega$.

Исследование свойств K -тестера показало, что интервал возможных значений его идентификационного параметра для всех сигналов составляет: $0 \leq K \leq 2$, при этом диапазон существования стационарных случайных сигналов (2mod – двумодального, asin – арксинусного, even – равномерного, simp – треугольного, gaus - нормального, lapl – двустороннее экспоненциального, kosh – Коши распределения) занимает область от 1 до 2.

Особенность отображения периодических сигналов с помощью данного идентификационного тестера состоит в том, что значение варибельности K зависит от частоты, увеличиваясь от 0 (для постоянного тока) до предельного значения $K=2$ – на частотах близких к граничной (по Котельникову). Таким образом, существует зона ($K \geq 1$) перекрытия периодических и случайных сигналов, в которой эти сигналы не различимы.

Отсюда следует предложение – считать те сигналы регулярными (не хаотичными), для которых измеренное значение $K < 1$, а значение частоты, при которой $K=1$ – называть идентификационной граничной частотой $F_{id} = F(K=1)$.

Таким образом, в соответствии с рассмотренной интерпретацией, динамический хаос есть такое свойство периодических сигналов, при котором они выглядят, как случайные (рисунк 1).

Рассмотрим возможность представления динамического хаоса на качественном уровне, используя теорию нечетких множеств [6]. Введем лингвистическую переменную (ЛП) «Chaos-D» со значениями: «Regul», «Semi-Regul», «NullRegul», «SemiChaot» и «Chaot» сигнал, с областью определения $0 \leq M(K) \leq 1$. Зададим вид функции принадлежности: $M(K)$

= $0,5 \cdot [1 - \cos(\pi K/2)]$ и определим границы соответствующих диапазонов по параметру K (таблица 1).

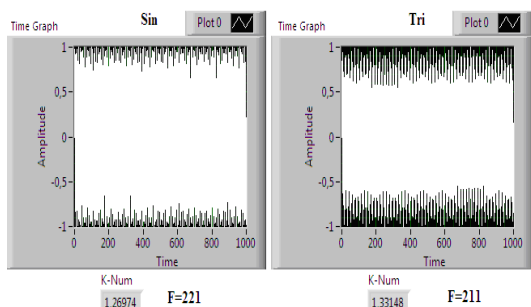


Рисунок 1 - Периодические сигналы синусоидальной и треугольной формы, эквивалентные случайным сигналам с арксинусным и равномерным распределениями

Таблица 1

K	0-0,5	0,5-0,95	0,95-1,05	1,05-1,5	1,5-2
M(K)	0-0,15	0,15-0,46	0,46-0,54	0,54-0,85	0,85-1,0
Класс	regul	semiregul	nuii	semiChoat	choat

Представление принадлежности характеристики динамического хаоса является универсальным и может быть легко «настроено» под конкретную прикладную задачу выбором числа диапазонов варибельности и вида функции принадлежности. При этом, значение функции принадлежности по физическому смыслу является оценкой степени хаотичности ($M = \text{ChaosFactor}$).

Метод оценки статического хаоса

Методика оценки статического хаоса основана на свойстве согласованной упорядоченности идентификационных шкал (ИШ) распределений. Одним из примеров ИШ является таблица 2, где: S – параметр формы сигнала, определяемый, в соответствии с теорией идентификационных измерений [7].

Таблица 2 - Идентификационная шкала сигналов

S	Вид распределения случайного сигнала							
	2mod	asin	even	trap	simp	gaus	lapl	ko sh
100	92	75	63	51	36	20	2	

Идея измерения статического хаоса (рисунок 2) состоит в следующем. ИШ в форме таблицы 2 образует прямую последовательность упорядоченных имен эталонов (DirectScale). Реверсивная шкала (ReversScale) образуется путем упорядочивания имен эталонов в обратном порядке. Прямая и обратная шкалы представляют собой левую и правую границы интервала существования всех неупорядоченных списков

(MeasurementScale) этих эталонов (рисунок 2). Очевидно, что наиболее неупорядоченный (хаотичный) список будет располагаться в середине этого интервала.

Достоинством подобного представления является потенциально высокая разрешающая способность, определяющая максимально возможное число списков имен эталонов: $R = n! = 9! = 362880$.

Можно предложить два способа количественной оценки положения измерительной шкалы относительно левой и правой границ.

Первый способ основан на подсчете числа совпадений имен эталонов, находящихся в одинаковых позициях измерительной и граничных шкалах. В частности, на рисунке 2 показана ситуация, в которой измерительная шкала, соответствующая измеренному значению $S_x = 20$, имеет 1 совпадение (kosh) с прямой и ни одного совпадения с обратной шкалой. В этом случае, относительная неупорядоченность измерительной шкалы будет составлять $C = \text{ChaosFactor} = 1/8 = 0,125$.

Несовершенство первого способа состоит в том, что он не учитывает начальные и конечные номера имен эталонов в сравниваемых шкалах.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ХАОТИЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

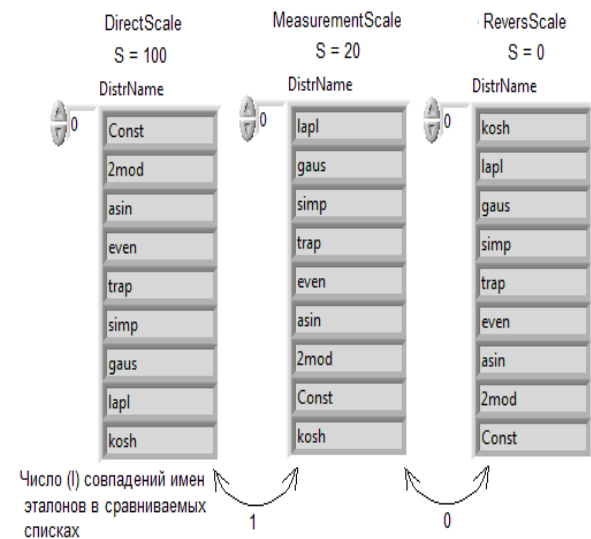


Рисунок 2 - Иллюстрация методики оценки степени статической хаотичности результатов идентификационных измерений

Чтобы учесть влияние исходных позиций эталонов на оценку степени хаотичности, необходимо подсчитывать разности между номерами позиций разных шкал: прямой и измерительной, обратной и измерительной, прямой и обратной. Разность номеров позиций между прямой и обратной шкалами явля-

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

ется величиной постоянной и для 9-ти эталонов составляет: $\Delta_{dr} = 40$. Для примера, когда $S_x=20$, соответствующие позиционные разности будут определяться по формулам расстояния: $\Delta_{dm} = \text{Sum}[\text{abs}(P_d - P_m)] = (7+5+3+1+1+3+5+7+0)=32$; $\Delta_{rm} = \text{Sum}[\text{abs}(P_r - P_m)] = (1+1+1+1+1+1+1+1+8)=16$.

Здесь символом P обозначены номера позиций эталонов соответствующих шкал. Чтобы получить нормированную оценку, необходимо использовать формулу: $\alpha = (\Delta_{dm} - \Delta_{rm})/\Delta_{dr}$ где: показатель $-1 \leq \alpha \leq 1$ является относительной мерой близости (удаленности) измерительной шкалы от прямой ($\text{sign } \alpha < 0$) и обратной ($\text{sign } \alpha > 0$), соответственно. Максимальная неопределенность положения измерительной шкалы имеет место при $\alpha = 0$. Для рассматриваемого примера, неопределенность измеренного значения ($S_x=20$), будет составлять: $\alpha = (32 - 16)/40 = 0,4$.

Если просканировать значение S_x в диапазоне от 0 до 100, можно получить полную характеристику хаотичности, как по критерию совпадений (верхний график), так и по критерию расстояний (нижний график, рисунок 3).

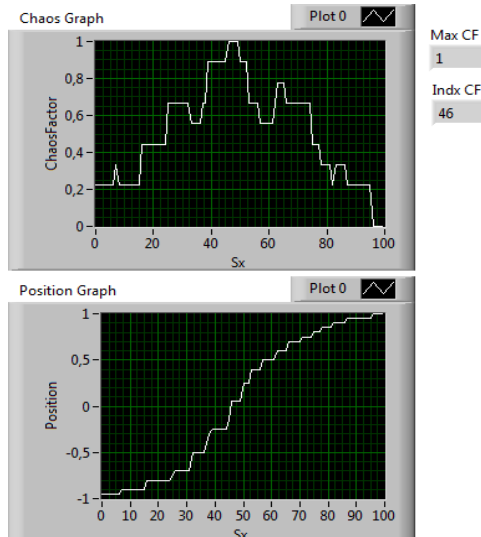


Рисунок 3 - Графики распределений показателей хаотичности для критерия совпадений (вверху) и критерия расстояний (внизу)

Показатель хаотичности в форме расстояний (Position) имеет однозначную характеристику с меньшей, чем у характеристики совпадений (ChaosFactor), дискретностью. Поэтому, имеет смысл описать ее в аналитической форме, подобрав соответствующую модель, например, как это сделано и представлено на рисунке 4.

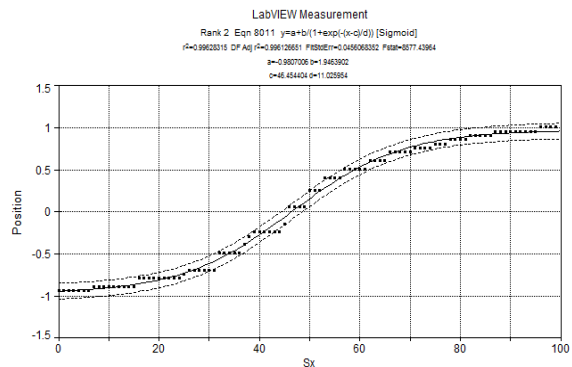


Рисунок 4 - Характеристика статического хаоса в терминах относительного расстояния

Выбор для характеристики (рисунок 4) аналитической зависимости, например, в виде сигмоидальной функции:

$$\alpha = A + B/[1 + \exp(-(S_x - C)/D)],$$

где: $A \approx -1$; $B \approx 2$; $C \approx 46,5$; $D \approx 11$, дает возможность «сгладить» скачки и, таким образом, получить непрерывную модель неопределенности результатов идентификационных измерений.

Физический смысл полученной зависимости состоит в том, что она определяет функцию принадлежности результатов измерения левой и правой границам диапазона преобразования.

Классификационное представление статического хаоса образуется, по аналогии с динамическим хаосом (таблица 1), введем ЛП «Chaos-S» со значениями: «Order», «SemiOrder», «NullOrder», «SemiDisorder» и «Disorder» сигнал, с областью определения $0 \leq M(K) \leq 1$.

Результаты моделирования

Рассмотренные методики измерения статического и динамического хаоса были реализованы в структуре виртуального прибора (SK-class.vi), выполненного в среде LabVIEW (рисунок 5).

Данный ВП содержит: модуль измерения (S-vector.vi), интерполятор (S-interpole.vi), транслятор (S-NameCompute.vi) и классификационное устройство, состоящее из пороговых элементов, переключателей и базы данных имен классов.

Модуль (S-vector.vi) измеряет идентификационные параметры (K, S) входного сигнала, представленного своей выборочной реализацией (Input Array). Интерполятор оценивает значение показателя статической хаотичности по критерию расстояния (рисунки 3 и 4). Транслятор определяет по измеренному значению идентификационного параметра S имя распределения мгновенных значений сигнала, используя данные таблицы 2. Клас-

сификационное устройство формирует лингвистические термы принадлежности входного сигнала заданным классам статического и динамического хаоса.

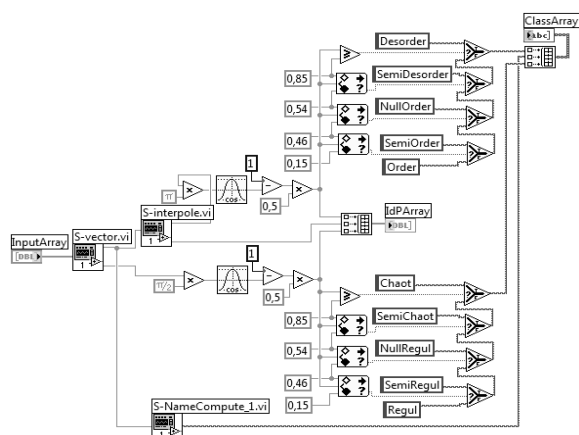


Рисунок 5 - Структура программного кода виртуального прибора, измеряющего статическую и динамическую хаотичность сигналов

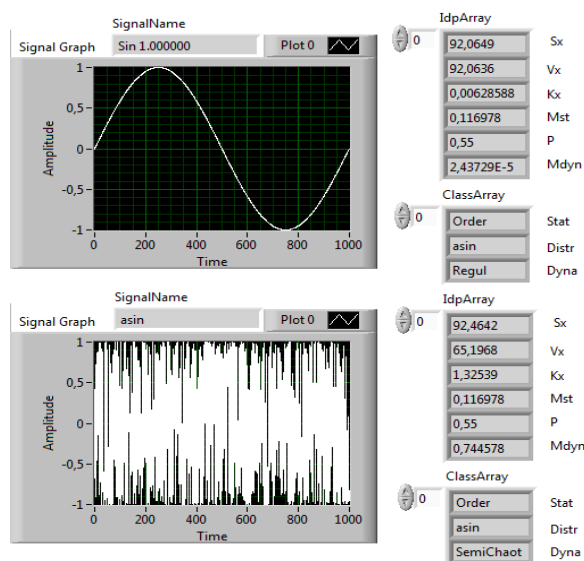


Рисунок 6 - Тестовый пример сравнения двух сигналов

Выходная информация об анализируемых сигналах (рисунок 6) представляется на качественном уровне 3-х мерным вектором (ClassArray) имен статического (Stat) и динамического (Dyna) хаоса, а также именем распределения (Distr). В окне IdPArray даны количественные оценки основных идентификационных параметров сигнала: S_x – параметр формы сигнала, V_x – параметр формы приращений сигнала, K_x – параметр вариабельности входного сигнала, M_{st} – степень принадлежности сигнала шкале статического

хаоса по критерию совпадений, P – степень принадлежности сигнала шкале статического хаоса по критерию расстояния (рисунок 3), M_{dyn} – степень принадлежности сигнала шкале динамического хаоса.

Сравнение сигналов (Sin-1, asin) тестового примера показывает, что они имеют одинаковые классификационные значения (Order, Distr) по параметру статического хаоса (Order≈0,117; Position=0,55) и форме распределения (Forma=asin) мгновенных значений.

Основное отличие состоит в классификационных и числовых значениях динамического хаоса (Dyna), что полностью соответствует, принятым выше, теоретическим моделям.

Заключение

Классификационные возможности рассмотренных методов оценки статического и динамического хаоса естественным образом ориентированы на решение задач идентификации сигналов в системах медицинской и технической диагностики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986. – 192 с.
2. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991.
3. Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М., Панас А.И., Синякин В.Ю. Технологическая платформа для создания приемопередатчиков на основе хаотических сигналов. – М.: Успехи современной радиоэлектроники, 2008, №1, с. 77–83.
4. Кликушин Ю.Н., Кошек К.Т. Классификатор сигналов. //Интернет издание «Журнал Радиоэлектроники». - М.: Изд-во ИРЭ РАН, № 10(октябрь), 2007. <http://jre.cplire.ru>
5. Кликушин Ю.Н. Идентификационные инструменты анализа и синтеза формы сигналов: монография. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 216 с.
6. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта//Под ред. Д.А.Поспелова. – М.: Наука, 1986.
7. Кликушин Ю.Н., Данилюк Р.В. Особенности идентификационной шкалы S-типа// Омский Научный Вестник – Омск: Изд-во ОмГТУ, №1(34), 2006, с.135-138.

Реквизиты для справок: Россия, 644050, Омск, пр. Мира, д.11, ОмГТУ, кафедра «Технология электронной аппаратуры» (ТЭА), тел. (3812) 65-26-69. Ю.Н. Кликушин, профессор кафедры ТЭА, д.т.н., доцент. E-mail: iit@omgtu.ru А.А. Горшенков, доцент каф. ТЭА, к.т.н. E-mail: gorshenkov@omgtu.ru