

УДК 621.317.08; 621.317.1; 621.317.6

## **«ТЕМПЕРАТУРНАЯ» ШКАЛА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТИ**

**А. А. Горшенков, В. А. Захаренко, Ю. Н. Кликушин**  
Омский государственный технический университет (ОмГТУ)

Получена 25 октября 2010 г.

**Аннотация.** Предложен способ описания и измерения формы распределения вероятности сигналов с помощью международной температурной шкалы (МТШ-90).

**Ключевые слова:** алгоритм, идентификационные измерения, международная температурная шкала, распределения вероятности, сигналы, степень неупорядоченности, хаотичность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы, в теории и технике измерений стало интенсивно развиваться новое направление – идентификационные измерения (ИИ) сигналов [1,2]. Содержанием ИИ является измерение формы и вариабельности сигналов и их характеристик. Важным достижением теории ИИ служит установление связи между амплитудными, частотными и временными параметрами сигналов в виде идентификационной модели [3]. Эта модель является универсальной в том смысле, что единым образом отображает особенности любых, как регулярных, так и хаотичных сигналов, что позволяет унифицировать многие алгоритмы цифровой обработки.

Основным, неформальным компонентом идентификационной модели сигналов является идентификационная шкала (ИШ). ИШ представляет собой эмпирический объект, который не может (по крайней мере, на данном уровне познания) быть сформирован, исходя из теоретических соображений. Однако, будучи сформированным, этот объект может быть описан формально, в виде ранговой зависимости, связывающей количественные оценки и качественные

(например, лингвистические) характеристики группы однородных объектов между собой. Для примера, в табл. 1 представлена сигнальная ИШ [4], реперные точки которой образованы словарем имен распределений симметричных, случайных сигналов (двумодального - 2mod, арксинусного - asin, равномерного - even, трапециевидного - trap, треугольного - simp, нормального - gaus, двустороннего экспоненциального - lapl и Коши - kosh).

Таблица 1

Идентификационная шкала распределений симметричных случайных сигналов

N=10000, L=100	Имя распределения случайного сигнала							
	2mod	asin	even	trap	simp	gaus	lapl	kosh
Rank	1	2	3	4	5	6	7	8
A- параметр формы	4	6,28	8	10	12	19	36	3000
$\Delta A$ - погрешнос ть	0,001	0,06	0,1	0,2	0,25	2	7	3000

Естественно, что, в силу эмпирического характера эталонов, оценки параметра (A) формы ИШ имеют, как случайную, так и систематическую, составляющие погрешности ( $\Delta A$ ). Уменьшение случайной составляющей погрешности связано со статистическими методами обработки, например, путем увеличения числа (L) реализаций процесса. Систематическая составляющая обусловлена зависимостью параметра (A) формы от объема выборки (N). Поэтому, на практике, ИШ приходится адаптировать к условиям конкретной прикладной задачи.

Чтобы кардинально решить проблему повышения точности сигнальной ИШ, авторы предлагают использовать температурную шкалу, например, МТШ-90 [5], которая, во-первых, содержит существенно большее число реперных точек (эталонов). Поэтому погрешность дискретности МТШ-90 меньше такой же погрешности сигнальной шкалы (табл. 1). Во-вторых, положение реперных точек МТШ-90 отличается высокой стабильностью, которая обеспечивается

метрологическими службами развитых стран, призванных хранить соответствующие эталоны.

В процессе реализации данной идеи авторам необходимо было провести ряд исследований, связанных с разработкой методики адаптации температурной шкалы к задаче измерения формы распределений вероятности. Результаты исследований представлены в данной работе.

## МЕТОДИКА И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Убежденность авторов в правильности предлагаемой идеи основана на структурной (внешней) и физической (внутренней) аналогии между сигнальной и температурной шкалами.

Структурная аналогия заключается в том, что обе эти шкалы отображают упорядоченную связь кортежей одного и того же типа *<ранг; имя эталона; значение физического параметра; состояние эталона>*. В табл. 2 представлен пример модернизированной МТШ-90.

Таблица 2

Модернизированная международная температурная шкала

Ранг	Имя эталона	Температура, К	Состояние
1	Vac	0	Абсолютный нуль (вакуум)
2	He	4,2	Точка кипения гелия
3	H <sub>21</sub>	13,8	Тройная точка водорода
4	H <sub>22</sub>	17	Давление паров водорода
5	H <sub>23</sub>	20,3	Давление паров водорода
6	Ne	24,6	Тройная точка неона
7	O <sub>2</sub>	54,4	Тройная точка кислорода
8	N	77,4	Точка кипения азота
9	Ar	83,8	Тройная точка аргона
10	Hg	234,3	Тройная точка ртути
11	H <sub>2</sub> O	273,2	Тройная точка воды
12	Ga	302,9	Точка плавления галлия
13	H <sub>2</sub> Oк	373	Точка кипения воды
14	In	429,7	Точка затвердевания индия
15	Sn	505	Точка затвердевания олова
16	Zn	692,7	Точка затвердевания цинка
17	S	717,8	Точка кипения серы
18	Al	933,5	Точка затвердевания алюминия
19	Na	1156	Точка кипения натрия
20	Ag	1235	Точка затвердевания серебра

21	Au	1337,3	Точка затвердевания золота
22	Cu	1357,8	Точка затвердевания меди
23	Ni	1728	Точка затвердевания никеля
24	Pt	2041	Точка затвердевания платины
25	W	3687	Точка плавления вольфрама

Модернизация классической МТШ-90 заключалась в следующем. Во-первых, в ее состав был включен ряд высокотемпературных металлов. В качестве конечной точки шкалы выступает вольфрам (W). Во-вторых, введена начальная реперная точка абсолютного нуля с именем «Vac» и реперная точка гелия (He) с температурой 4,2 К. В-третьих, из молекулярных соединений добавлена точка кипения воды. В-четвертых, значения температуры округлены до десятых долей. В результате, температурная ИШ стала содержать 25 реперных точек (табл. 2).

Сигнальная ИШ (табл. 1) была модернизирована введением начальной нулевой реперной точки, при этом общее число эталонов стало равно 9.

Физическая аналогия между сигнальной и температурной шкалами состоит в том, что и параметр формы, и температура являются агрегированными, количественными мерами распределения энергии некоторой системы.

Сложность сопоставления сигнальной и температурной шкал состоит в том, что МТШ-90 является сильно неоднородной системой, состоящей из разного типа элементов, находящихся в разных агрегатных состояниях.

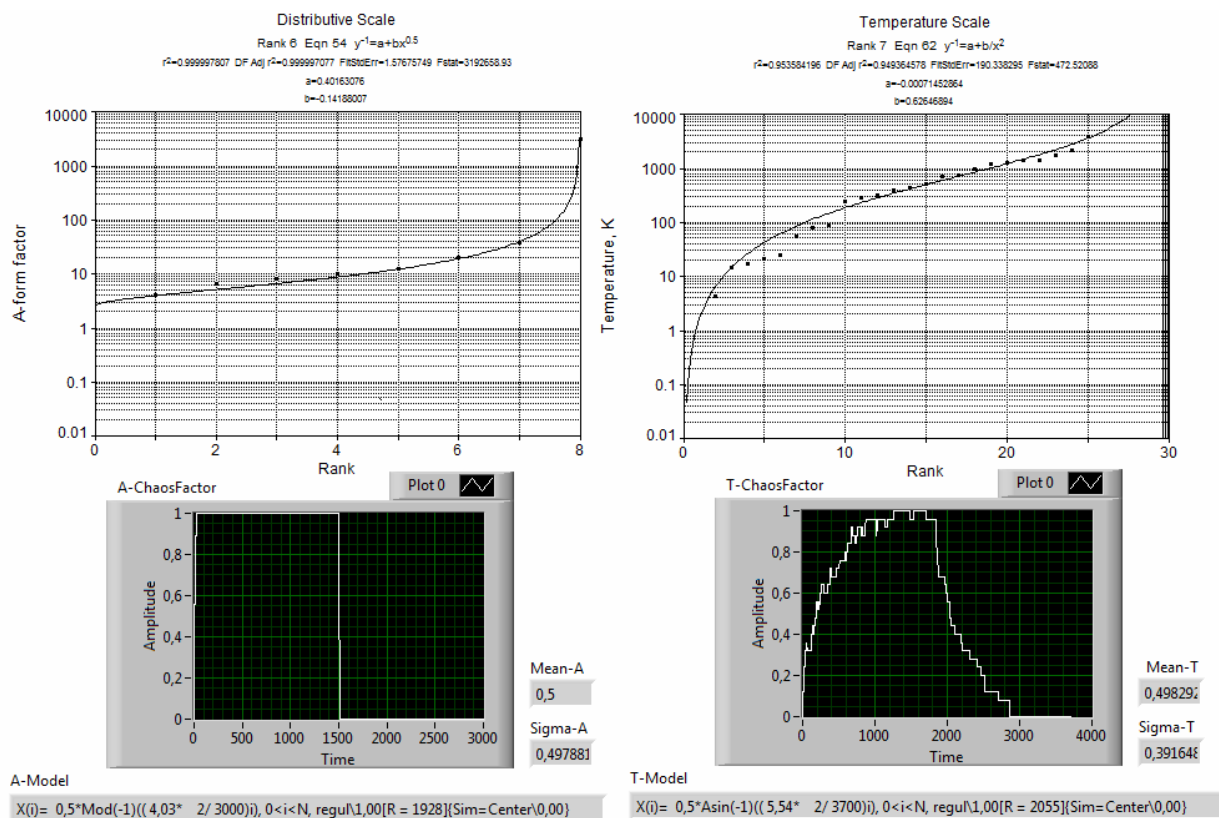


Рис. 1. Ранговые (вверху) зависимости сигнальной и температурной шкал и их характеристики неупорядоченности (внизу)

Методика исследований состояла из двух этапов. На первом этапе решалась задача сравнения структур сигнальной и температурной ИШ. Во-первых, такое сравнение можно провести по виду и аналитическому описанию ранговых зависимостей, представленных в табл. 1 и 2, соответственно. Во-вторых, сравнивать ИШ можно по характеристикам неупорядоченности. Оба варианта проиллюстрированы соответствующими графиками на рис. 1, где представлены также модели распределений неупорядоченности, полученные с помощью метода, описанного в [6]. Идентификационные модели характеристик неупорядоченности были получены в соответствие с алгоритмом, изложенным в работе [3], в предположении, что эти характеристики имеют временную развертку по оси абсцисс. Согласно идентификационным моделям, характеристика неупорядоченности сигнальной шкалы является регулярным процессом и имеет двумодальное ( $\text{Mod}(-1)$ ) распределение. Характеристика

неупорядоченности температурной шкалы также является регулярной, но имеет арксинусное ( $A\sin(-1)$ ) распределение.

Визуальное сравнение характеристик неупорядоченности сигнальной и температурной шкал показывает, что в диапазоне от 20 до 1500 изменения аргумента, неопределенность сигнальной ИШ выше, чем у температурной шкалы. Следовательно, измерения формы распределения сигналов с помощью температурной шкалы более конструктивны. В частности, оценка степени неупорядоченности (Chaos Factor) одинаковых численно результатов измерения формы распределения ( $A = 23$  рад) и температуры ( $T = 23$  К), для сигнальной шкалы дает значение 1, а для температурной – только 0,24. На основании полученных данных, было принято решение оценивать неопределенность результатов измерения формы распределения сигналов с помощью температурной шкалы.

Второй этап исследований включал поиск и сравнение между собой таких сигналов, которые можно классифицировать с помощью температурной шкалы. Условием применения температурной шкалы для сравнения сигналов служит совпадение диапазонов существования идентификационных чисел параметра формы ( $A$ ) и значений температур МТШ-90. Сигнальная база данных включала примерно 200 образцов сигналов различной физической и информационной природы (периодические, случайные, фрактальные, аддитивные смеси типа сигнал-шум, музыкальные, диагностические и сложно-модулированные сигналы).

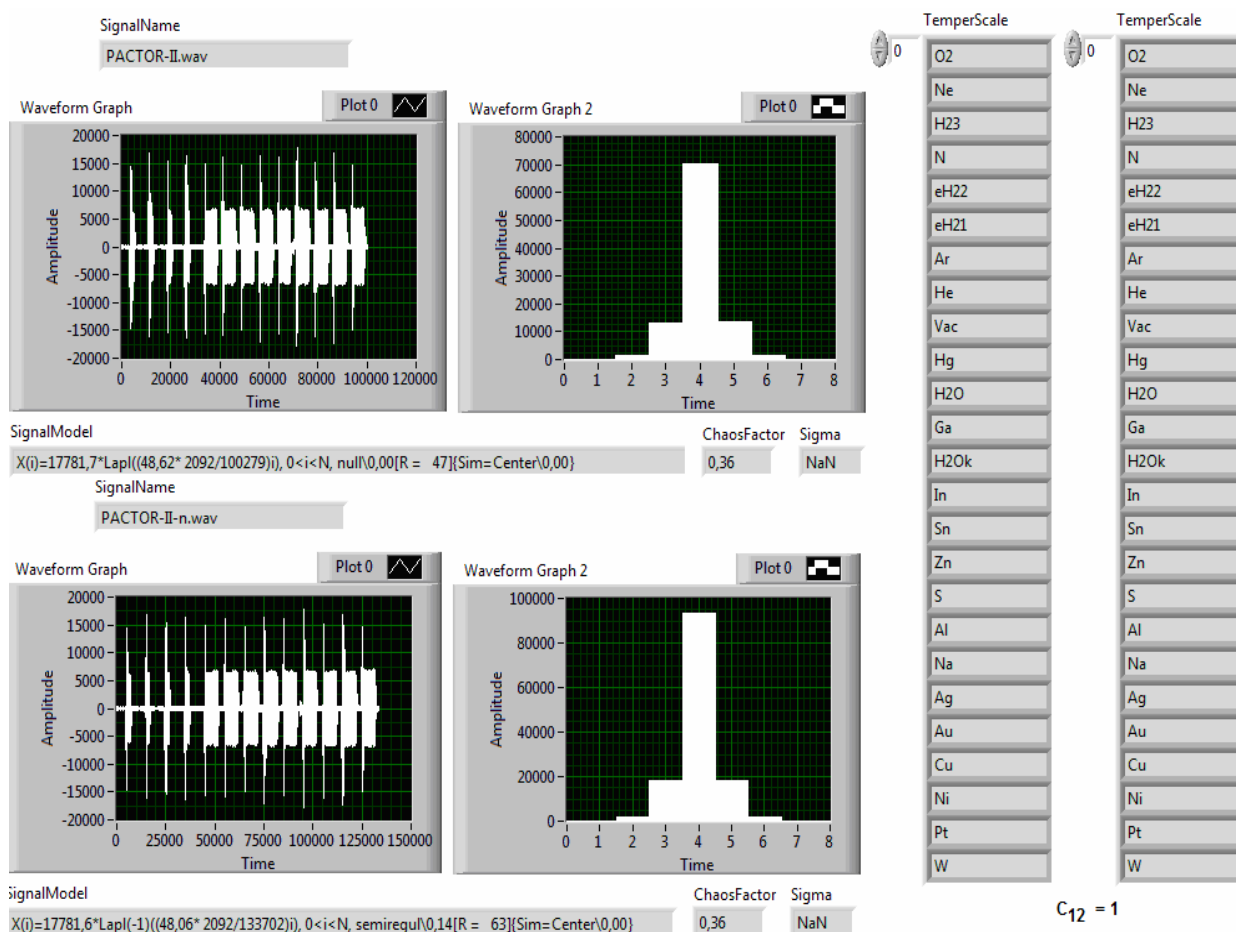


Рис. 2. Пример сравнения сигналов, имеющих одинаковую позиционную структуру в температурной шкале

На рис. 2-5 представлены некоторые ситуации попарного сравнения исследованных сигналов. Сравнение проводилось, во-первых, по числовой оценке показателя неупорядоченности (Chaos Factor). Во-вторых, по относительному числу имен реперных точек ( $C_{12}$ ), совпавших в соответствующих температурных шкалах сигналов, показанных на рисунках в правой части. В-третьих, сравнение осуществлялось по виду и параметрам идентификационных моделей сигналов (Signal Model). В-четвертых, использовалось визуальное сравнение временных и вероятностных характеристик.

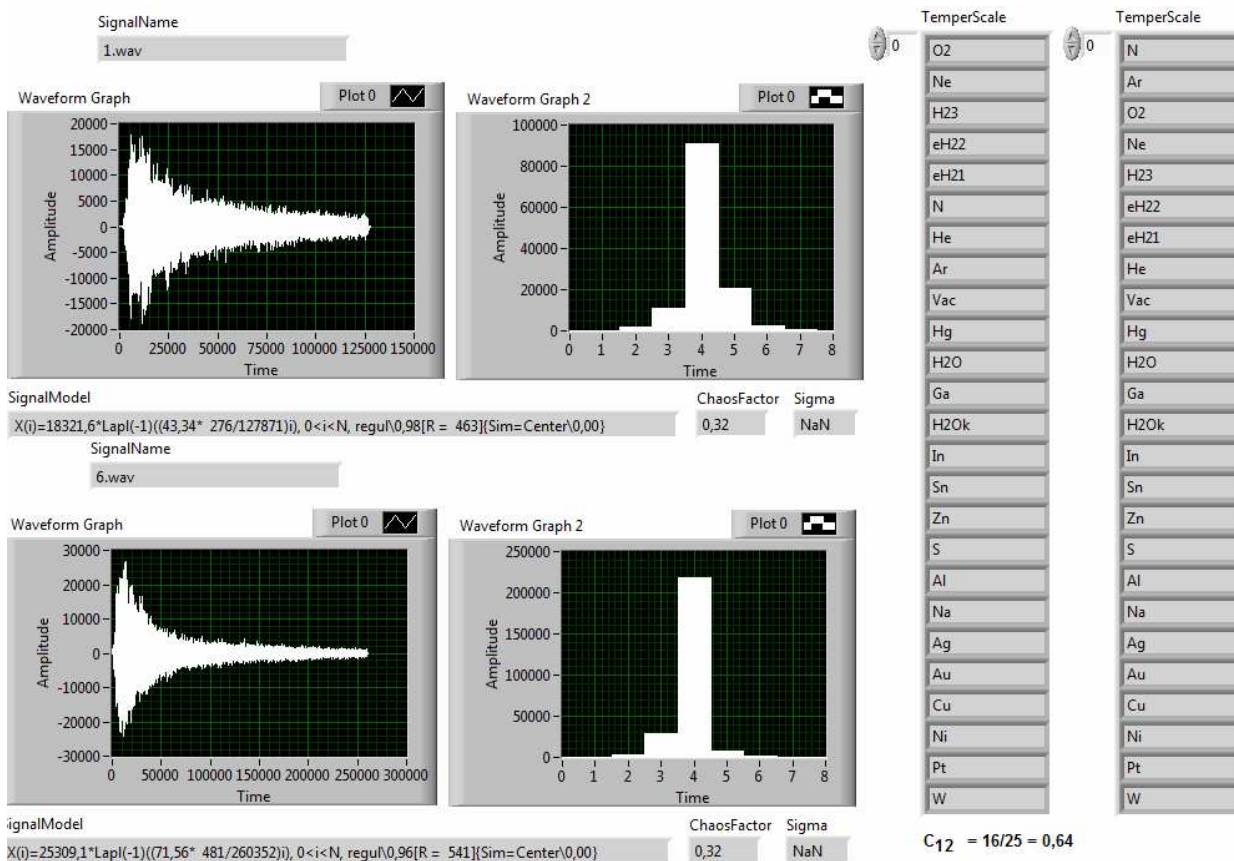


Рис. 3. Пример сравнения сигналов, имеющих одинаковую оценку степени неупорядоченности ( $\text{Chaos Factor} \approx 0,32$ ), но разные списки реперных точек

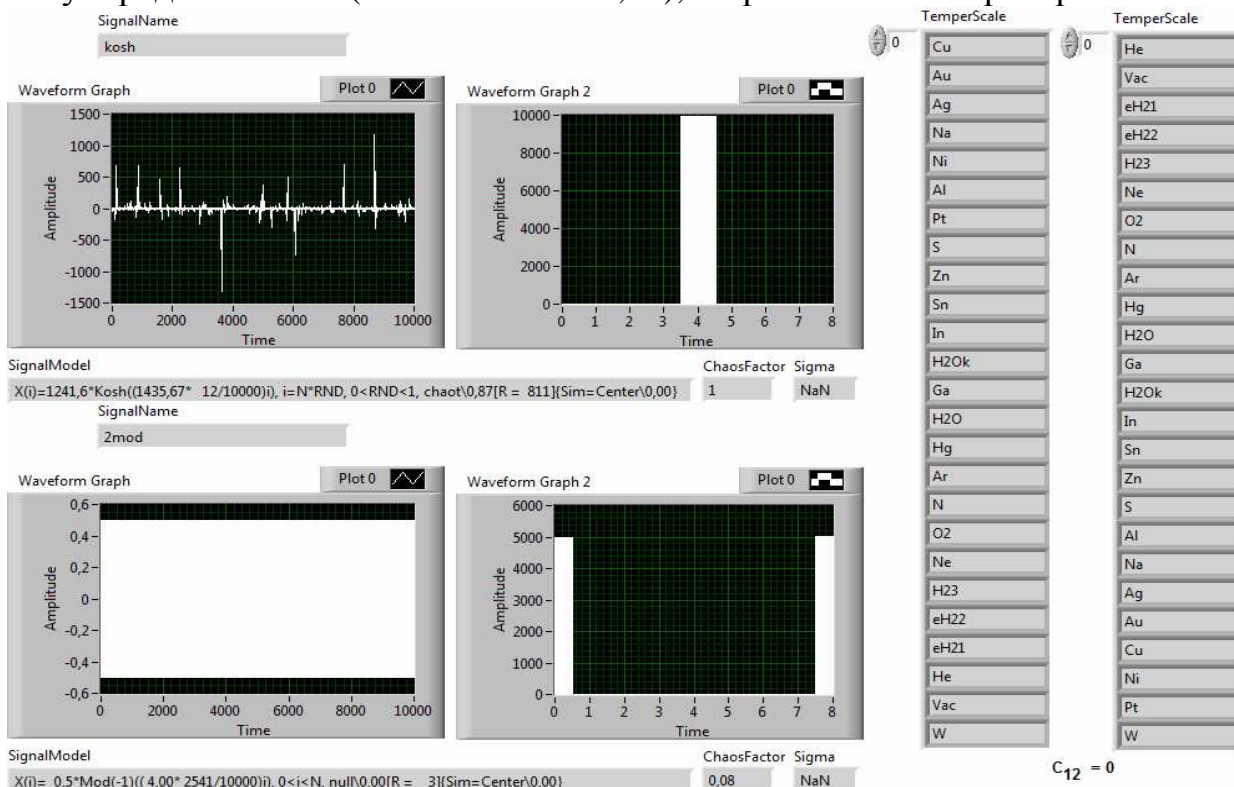


Рис. 4. Пример сравнения сигналов, находящихся вблизи противоположных границ степени неупорядоченности



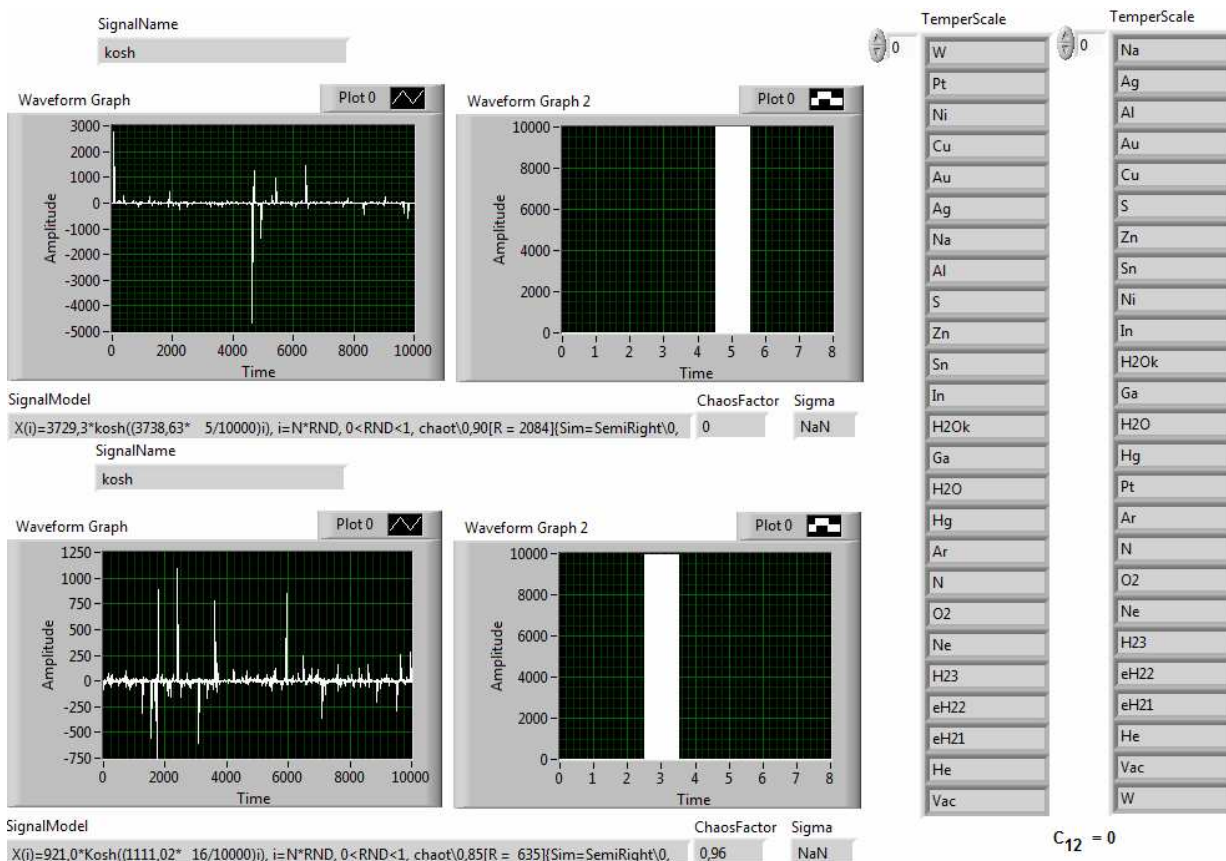


Рис. 5. Пример сравнения сигналов, подобных по форме распределения, но противоположных по степени неупорядоченности

Первая ситуация, показанная на рис. 2, соответствует случаю равенства двух сигналов по показателю Chaos Factor = 0,36, идентичности списков реперных точек и вида распределения (lapl) мгновенных значений. Сигналы отличаются по таким идентификационным параметрам, как степень регулярности-хаотичности (null\0 и semiregul\0,14) и разрешающей способности (R=47 и R=63). Из всех представленных примеров эта пара сигналов отличается максимальной похожестью, во временной области, по форме гистограмм и по количеству совпавших имен в списках реперных точек ( $C_{12} = 1$ ).

Вторая ситуация (рис. 3) соответствует случаю равенства двух сигналов по показателю Chaos Factor = 0,32 и совпадения имен идентификационных моделей (Lapl(-1)). Имеются отличия по разрешающей способности (R=463 и R=541) и идентификационной амплитуде (X = 18322 и 25309, соответственно). При одинаковой, общей тенденции поведения временной характеристики наблюдаются отличия в форме гистограмм. Похожесть сигналов оценивается

коэффициентом  $C_{12} = 0,64$ , определяющим общую часть списков реперных точек температурной шкалы.

Третья ситуация (рис. 4) описывает случай существенно различных сигналов, в качестве которых использовались стационарные случайные сигналы с распределениями *kosh* («высоко температурный сигнал» с ближайшей точкой затвердевания меди Cu), и *2mod* («низко температурный сигнал» с ближайшей точкой кипения гелия He), соответственно. Отличие этих сигналов проявляется также в несовпадении списков реперных точек ( $C_{12} = 0$ ).

Четвертая ситуация интересна тем, что результаты ( $A_1 = 3739$  и  $A_2 = 1111$ ) измерения формы двух случайных сигналов с распределением Коши, попали на противоположные границы ( $ChaosFactor_1 = 0$ ,  $ChaosFactor_2 = 0,96$ ,  $C_{12} = 0$ ) ниспадающего участка характеристики неупорядоченности (рис. 1, правая нижняя диаграмма) температурной шкалы. Для объяснения физики подобного эффекта требуется проведение дополнительных исследований.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенными исследованиями установлено, что, во-первых, температурная шкала может быть использована для измерения распределений мгновенных значений сигналов. При этом численные оценки формы распределений должны оцениваться по шкале (табл. 1), которая по диапазону значений совпадает с МТШ-90.

Во-вторых, модернизированную МТШ-90 удобно использовать для оценки степени неупорядоченности результатов измерения формы сигналов, как вследствие монотонности характеристики, так и по причине большего количества реперных точек.

В-третьих, если считать понятия «неупорядоченность» и «хаотичность» синонимами, то понятия «степень неупорядоченности» и «степень хаотичности» можно принять как тождественные и использовать их для количественных измерений фундаментальных свойств сигналов. В свою

очередь, эти понятия хорошо коррелируются с понятием «неопределенность» результата измерения, которое, согласно новым метрологическим стандартам [7] должно применяться для оценки качества любых измерений. Если такое представление правильно, то описанная в данной работе методика, дает исследователям простой и физически понятный инструмент количественной оценки «неопределенности».

В-четвертых, следует различать свойства хаотичности сигналов, оцененные по методике, предложенной в работе [3] и основанной на измерениях вариабельности (угловой скорости вращения вектора сигналов), и оцененные по описанной выше методике, основанной на измерении порядка следования эталонов идентификационной шкалы. Предлагается считать обе оценки правомочными, но принадлежащими «динамической» и «статической» составляющим одного и того же свойства, соответственно. Возможна также интерпретация, использующая понятия «мнимой» и «действительной» частей единого вектора хаотичности. В любом случае, оба подхода для своего обоснования требуют проведения дополнительных исследований.

Перспективы использования результатов проведенных исследований связаны с решением задач идентификации и распознавания сложных сигналов, например, при мониторинге различных геофизических процессов, а также в медицинской и технической диагностике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кликушин Ю.Н. Технологии идентификационных шкал в задаче распознавания сигналов: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – 96 с.
2. Кликушин Ю.Н., Кошеков К.Т. Методы и средства идентификационных измерений сигналов: монография. – Петропавловск: Изд-во СКГУ им. М. Козыбаева, 2007. – 186 с.

3. Горшенков А.А., Кликушин Ю.Н. Представление моделей сигналов в системе идентификационных параметров. // Интернет издание: Журнал Радиоэлектроники, № 9, 2010, М.: ИРЭ РАН. <http://jre.cplire.ru>
4. Кликушин Ю.Н. Идентификационные инструменты анализа и синтеза формы сигналов: монография. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 216 с.
5. Интернет-ресурс: <http://www.temperatures.ru/mtsh>
6. Кликушин Ю.Н., Кошеков К.Т. Классификатор сигналов. // Интернет издание: Журнал Радиоэлектроники, № 10, 2007, М.: ИРЭ РАН. <http://jre.cplire.ru>
7. JCGM 104:2009 “Evolution of measurement data – An introduction to the “ Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents” – ISO/IEC Guide 98-1:2009.