

Ю. П. Мачехин, Ю. С. Курской

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

The paper presents the results of research that is aimed at creating the approaches and models for measurement of the dynamic quantities of nonlinear dynamic systems. The physical basis of Metrology of Nonlinear dynamic systems bases on Open systems theory, Dynamic chaos theory and Synergetic theory. It's presented the special measurement model and the model of measurement results analysis. As the special analysis tools are proposed to use a fractal dimension, Shannon entropy, a measurement portrait, the fractal and entropy scales. For the analysis of evolving systems it's proposed to use the time that system returns to its stable state after a normalized influence on it. The measurement models are proposed to use for measurement a human health.

Ключевые слова: нелинейные динамические системы, модель измерения, модель анализа результатов измерения, нелинейная метрология.

Введение

Темой Международного дня метрологии в 2016 году его организаторы — Международное бюро мер и весов (BIPM) и Международная организация по законодательной метрологии (OIML) — выбрали «Измерения в динамическом мире» [1]. Это свидетельствует о понимании в научных метрологических кругах существования проблем точного измерения динамических величин и о появлении новых измерительных задач.

Измерение величин (физических, химических или биологических), значения которых меняются с течением времени (динамических переменных), является одной из самых сложных метрологических задач. При этом наибольшие трудности возникают при измерении величин открытых систем со сложной, нелинейной динамикой поведения. Такие нелинейные динамические системы (НДС) широко представлены в окружающем мире. Это системы физического, биологического и социального происхождения. Несмотря на различную природу происхождения и размеры, НДС имеют общие черты. Динамические переменные (ДП) таких систем подвержены влиянию множества внутренних и внешних факторов, их поведение часто носит нерегулярный, хаотичный характер, они подвержены внешним влияниям [2]. Примерами таких систем являются: климат, Мировой океан, лазер, человек [3–5].

Необходимость корректного измерения ДП описанных систем привело к необходимости выработки физических основ метрологии нелинейных динамических систем и создания специализированного направления — нелинейной метрологии — основной задачей которого является измерение величин со сложной нелинейной динамикой, подверженных внешним воздействиям и флуктуациям, а в ряде случаев способных к самоорганизации [6–11].

Целью работы является обзор физических основ метрологии нелинейных динамических систем, инструментов и моделей измерения динамических переменных со сложной динамикой.

Ключевые положения метрологии нелинейных динамических систем

Физические основы метрологии нелинейных динамических систем базируются на представлениях теории открытых систем, теории динамического хаоса и синергетической теории [3]. Для измерения ДП НДС и последующего анализа созданы модель измерения [9] и модель анализа результатов измерения [10]. В качестве инструментов анализа предложено использовать фрактальные и энтропийные шкалы состояния НДС [7, 11]. Для анализа состояния эволюционирующих НДС, к которым можно отнести биологические системы и живые организмы, предложено использовать время возвращения системы в устойчивое состояние после нормированного воздействия [6]. В качестве математического аппарата предлагается использовать методы интервальной математики [12].

При построении модели измерения ДП НДС предполагалось, что объект представляет собой квазиизолированную систему с неизвестными значениями и характером поведения ДП [9]. Квазиизолированность подразумевает отсутствие обмена веществом между системой и окружающей средой, но не исключает взаимного влияния и теплообмен. Поскольку хаотичное поведение является априори более сложным, чем случайное, полагается, что система — диссипативная НДС с хаотичным поведением. Такой подход позволяет использовать единую модель измерения, изначально ориентированную на самую сложную ситуацию, но позволяющую на определенном этапе идентифицировать поведение системы

и сделать выбор в пользу использования математического аппарата для хаотичного или случайного процесса. Ключевыми элементами модели являются: схема измерительного эксперимента; способ оценки необходимого и достаточного количества информации; способ классификации процесса и выбор математического аппарата обработки результатов измерения; способ оценки результатов измерений.

Особенность измерения величин X со сложной нелинейной динамикой заключается в том, что они не могут быть охарактеризованы одной величиной, а лишь интервалом значений $[X_{\min}, X_{\max}]$, при этом распределение X внутри интервала не может быть описано нормальным распределением. Поэтому задача измерения ДП НДС заключается в оценке интервала всех возможных значений ДП и анализе этого интервала.

Модель анализа результатов измерения ДП НДС [10], кроме оценки интервала всех возможных состояний ДП $X [X_{\min}, X_{\max}]$, требует определения и других параметров, характеризующих свойства и поведение системы. Определение этих параметров требует восстановления фазового портрета НДС. Предлагаемый подход к анализу результатов измерения состоит из ряда этапов: определение фрактальной размерности D_F , определение размерности вложения аттрактора; восстановление фазового портрета; определение локальных (показатели Ляпунова, время предсказания) и общих характеристик (энтропия Шеннона) НДС.

При измерении и анализе результатов измерения ДП НДС возникает вопрос о возможности составления уравнения измерения. В большинстве случаев составить корректное уравнение измерения невозможно. Поэтому предложена альтернатива в виде портрета измерения, который представляет собой отображение результатов измерения в фазовом пространстве НДС.

В работе [7] для классификации характера динамики системы была предложена фрактальная шкала временных рядов результатов измерений. Шкала представляет собой интервал значений фрактальной размерности D временного ряда результатов измерения от 1 до 2. Фрактальная размерность D определяется по методу Херста [13]. Значение D позволяет классифицировать процесс и выбрать инструмент анализа результатов измерения: $D = 1$ – процесс регулярный, отсутствует случайная составляющая; $D = 1,5$ – процесс случайный; $1 < D < 1,5$, $1,5 < D < 2$ – процесс хаотичный; $D = 2$ – разброс значений значительно преобладает над значением измеряемой величины. Если процесс классифицирован как случайный или регулярный, для анализа результатов измерения могут быть применены стандартизированные подходы, предлагаемые Руководством по выражению неопределённости результатов измерения [14, 15]. Если процесс и система классифицированы как хаотичные, должны быть использованы подходы и инструменты оценки, разработанные для НДС.

Для количественной оценки состояния и характеристик систем со сложным, хаотичным поведением в работе [11] предложено использовать фрактально-энтропийный анализ. Энтропия Шеннона H является ключевым элементом модели измерения ДП НДС [12]. В информационной теории измерений она используется как характеристика разброса результатов измерений. Однако в случае измерений ДП НДС энтропия характеризует не столько разброс, сколько разнообразие значений измеряемой величины с высоким уровнем вероятности: чем больше значений она принимает с высокой степенью вероятности, тем больше энтропия. В случае марковского процесса энтропию можно определить через плотность вероятности $p(X_i)$ i -й ДП X_i :

$$H = -\sum_i p(X_i) \ln p(X_i).$$

Являясь характеристикой состояния системы, энтропия живых организмов меняется с течением времени. При этом ее значение может, как уменьшаться, так и возрастать вследствие внешних воздействий, внутренних процессов и эволюции системы. Наблюдение за значением энтропии позволяет делать вывод о состоянии эволюционирующей системы.

Определение энтропии Шеннона является сложной процедурой, связанной с необходимостью определения функции распределения результатов измерений $p(X_i)$. Поэтому возникла необходимость связать энтропию и фрактальную размерность временного ряда результатов измерений X_1, \dots, X_n . Полученное выражение связи имеет вид

$$H = \ln [2kR(n/2)^{D-2}],$$

где k – энтропийный коэффициент; R – размах между максимальным и минимальным значениями функции приращения $x(i, n)$; n – количество измерений.

Полученное выражение может быть использовано в моделях измерений и анализа результатов измерений ДП НДС.

Результаты перечисленных исследований позволили предложить модель измерения здоровья человека [6]. При этом организм человека рассматривается как открытая, диссипативная НДС с функцией самоорганизации. Разделяют устойчивое (состояние нормального функционирования) и возбужденное состояние организма, из которого организм постепенно возвращается в устойчивое состояние.

В модели использованы: интервалы значений ДП организма $X(t)$ (пульс, артериальное давление, температура) в устойчивом $[X_s^{\min}(t), X_s^{\max}(t)]$ и возбужденном $[X^{\min}(t), X^{\max}(t)]$ состояниях; нормированная энтропия Шеннона $\|H_s\|$, $\|H\|$ в устойчивом и возбужденном состояниях, соответственно; время прогноза поведения ДП $X(t)$ в устойчивом t_s и возбужденном t состояниях. В качестве основного показателя состояния здоровья рассматри-

вається время возврата T в устойчивое состояние после снятия нормированного внешнего воздействия. Для количественной оценки состояния здоровья предложены числовой портрет, энтропийные и временные шкалы:

$$\left. \begin{array}{l} [X_s^{\min}(t), X_s^{\max}(t)], \|H_{s0}\|, t_s; \\ [X_s^{\min}(t), X_s^{\max}(t)], \|H\|, t; \\ T \end{array} \right\};$$

$$\left. \begin{array}{l} 0, \dots, \|H_s\|, \dots, 1; \\ 0, \dots, T_s, \dots, \infty. \end{array} \right\}.$$

Реперной точкой энтропийной шкалы является норма энтропии H_s — значение энтропии Шеннона, соответствующее здоровому состоянию организма. Норма энтропии является индивидуальной характеристикой отдельного организма и меняет свое значение с течением времени. Предложен способ определения нормы энтропии, учитывающий индивидуальность и эволюционные изменения организма. В рамках модели решена задача определения значения величины внешнего нормированного воздействия, необходимого для определения времени возврата системы в устойчивое состояние T , используемого в качестве количественной характеристики здоровья.

В работе [12] предложено использовать методы интервальной математики для составления уравнения измерения энтропии Шеннона ДП НДС. Выбор обусловлен интервальным характером значений измеряемых динамических переменных. Ценность интервальных решений заключается в том, что они содержат точные решения исходных задач и дают возможность полного учета неопределённостей, включая неточные данные уравнения измерения. Получены уравнения измерения энтропии Шеннона отдельной динамической переменной и всей нелинейной динамической системы на основе интервальных представлений результатов измерения.

Таким образом, анализ физических основ, основных принципов, методов и инструментов, предлагаемых нелинейной метрологией, показал универсальность и комплексность подхода к решению сложной метрологической задачи — измерение величин со сложной нелинейной динамикой. Модели и инструменты нелинейной метрологии могут быть применены для измерения динамических переменных различных по происхождению открытых систем со сложной нелинейной динамикой её параметров как физических, так и биологических или социальных.

Выводы

Выполнен обзор физических основ, инструментов и моделей измерения динамических переменных нелинейных динамических систем.

Для измерения динамических переменных нелинейных динамических систем и последующего

анализа созданы модель измерения и модель анализа результатов измерения.

В качестве инструментов анализа предложено использовать фрактальные и энтропийные шкалы состояния нелинейных динамических систем. Для анализа эволюционирующих систем предложено использовать время возвращения системы в устойчивое состояние.

В качестве математического аппарата предлагается использовать методы интервальной математики. Ценность интервальных решений заключается в том, что они содержат точные решения исходных задач и дают возможность полного учета неопределённостей, включая неточные данные уравнения измерения.

Результаты исследований объединены в отдельное направление — нелинейную метрологию.

Модели и инструменты нелинейной метрологии могут быть применены для измерения величин различных по происхождению открытых систем со сложной нелинейной динамикой её параметров как физических, так и биологических или социальных.

Список литературы

- [1] Press release. World metrology day 2016 «Measurements in a dynamic world» / BIPM [Электронный ресурс]: — Режим доступа: worldmetrologyday.org/press_release.html/
- [2] Трубецков Д. И., Мчедлова Е. С., Красичков Л. В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2005. — 278 с.
- [3] Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение: пер. с нем. — М.: Мир, 1988. — 376 с.
- [4] Fisher W.P. New metrological horizons: invariant reference standards for instruments measuring human, social, and natural capital / W.P. Fisher // New metrological horizons: invariant reference standards for instruments measuring human, social, and natural capital: materials of 12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement. — Annecy, France. — 2008. — P. 51–58.
- [5] R. Feistel, R. Wielgosz, S.A. Bell, M.F. Camoes. Metrological challenges for measurements of key climatological observables: oceanic salinity and pH, and atmospheric humidity. Part 1: overview / Metrologia, — 53. — 2016.
- [6] Ю. П. Мачехин, Ю. С. Курской. Модель измерения здоровья человека. Метрологический подход // Метрологія та прилади. — 2014. — Вып. 02 (46). — С. 40–44.
- [7] Мачехин Ю. П. Фрактальная шкала для временных рядов результатов измерений // Измерительная техника. — 2008. — № 8. — С. 40–43.
- [8] Мачехин Ю. П., Курской Ю. С. Монография «Основы нелинейной метрологии». Издательство: LAP LAMBERT Academic Publishing. ISBN: 978–3–65957–401–6, 2014.

- [9] Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Модель измерения параметров нелинейных динамических систем // Системы обработки информации. — 2012. — № 1 (99). — С. 169–175.
- [10] Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах // Системы обработки информации. — 2012. — № 7 (105). — С. 117–122.
- [11] Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Фрактально-энтропийный анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах // Измерительная техника. — 2014. — № 6. — С. 18–21.
- [12] Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской. Составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем с использованием методов интервального анализа // Приборы и методы измерений. — 2015. — Т. 6, № 2. — С. 257–263.
- [13] Федер Е. Фракталы. — М.: Мир, 1991. — 258 с.
- [14] ISO/IEC Guide 98–1:2009 Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement: стандарт / ISO, Женева, 27.08.2009.
- [15] ISO/IEC Guide 98–3:2008/Suppl.1:2008 /Cor.1:2009 Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) — Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method—Technical Corrigendum 1: стандарт / ISO, Женева, 07.05.2009.

УДК 53.083.2

М.И. Дзюбенко, В.П. Радионов

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ

Measurement of the refractive index of transparent materials in the terahertz (THz) range required for the development of devices and systems that operate in this range. Submillimeter lasers are one of the most affordable sources of coherent THz radiation. They have features that allow you to measure the refractive index of transparent materials. The method for on-line measuring the refractive index of transparent materials in the terahertz range is represented. The measurable substance is placed in a quasi-optical resonator. Measurements are performed by means of coherent terahertz electromagnetic radiation. Performed test measurements of the refractive index. Justification reducing error of measurement of the refractive index, taking into account the physics of the processes in the space of resonance submillimeter laser system, we conducted. It was shown that the accuracy of measurement of the refractive index can be greatly increased by placing the test substance in the resonator THz laser. Presented techniques for measuring the refractive index of transparent materials in the THz range can be used in various fields of science, technology and medicine.

Ключевые слова: *показатель преломления, терагерцевое когерентное электромагнитное излучение, квазиоптический резонатор, лазер субмиллиметрового диапазона.*

Постановка проблемы

Электромагнитное излучение терагерцевого (ТГц) диапазона (интервал частот 0,1...10 ТГц) в настоящее время находит широкое применение в различных областях науки, техники, биологии и медицины. Для передачи и обработки ТГц излучения применяют диэлектрические и металло-диэлектрические волноводы, а также различные квазиоптические системы – ответвители, преобразователи пучка, вентили, вращатели поляризации и др. В этих устройствах в составе диэлектрических компонентов волноводов, делительных пластин, линз, а также в материалах, заполняющих полости волноводов, применяют прозрачные для ТГц излучения вещества. При разработке и изготовлении упо-

мянутых устройств, особенно таких их элементов, как линзы и делительные пластины, необходимо знать величину показателя преломления (ПП) веществ, из которых они изготовлены. Например, при применении делительных пластин в резонансных системах необходимо выбрать такую их оптическую толщину, которая обеспечивает синфазность сигнала, отраженного от обеих ее рабочих поверхностей. Поэтому для выбора толщины делительной пластины необходимо знать величину ПП ее материала с величиной погрешности, которая часто отсутствует в справочных материалах. Кроме того, в квазиоптических системах используются композитные и слоистые материалы, например, слюда и текстолит, для которых характерен большой разброс значений ПП.