

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК:[621.398+004.89]

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

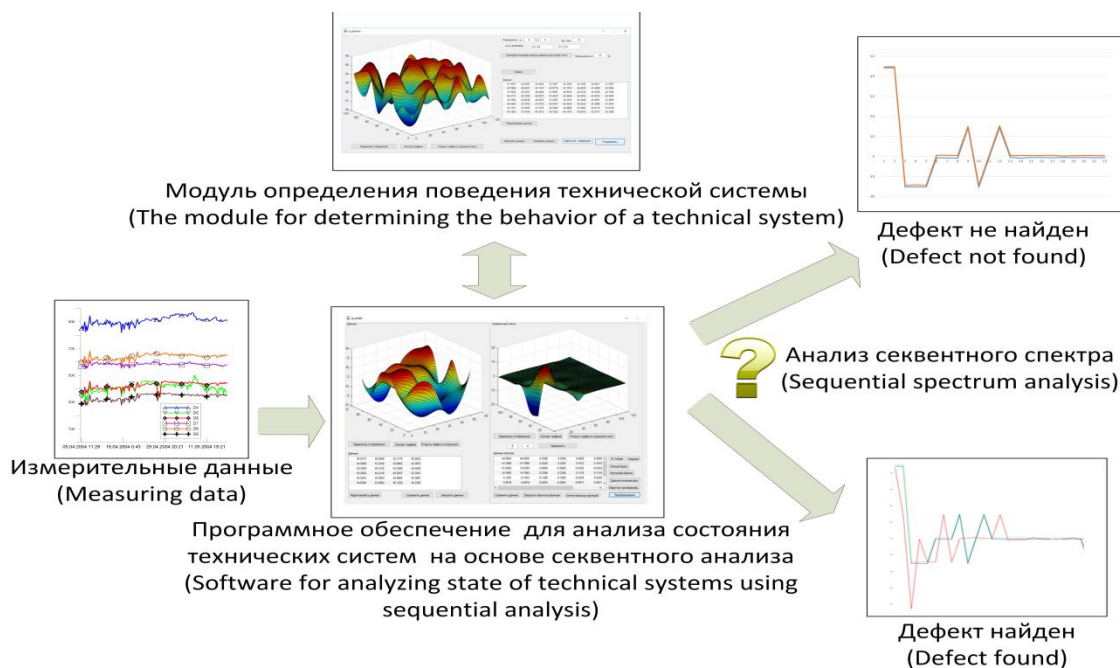
Статья поступила в редакцию 22.09.2018, в окончательном варианте – 20.11.2018.

Русаков Алексей Михайлович, МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Российская Федерация, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78, старший преподаватель, e-mail: rusal@bk.ru

В статье рассмотрены вопросы построения информационно-вычислительного комплекса, работающего в реальном времени и использующего данные, получаемые с системы датчиков через беспроводные сенсорные сети. Обработка получаемых данных осуществляется децентрализованно по мере её поступления непосредственно в сенсорных узлах на основе применения аппарата секвентного анализа. Целью обработки является оценка (определение) состояний технических систем в реальном времени; оперативное выявление аномальных состояний, в т.ч. нештатных и предаварийных ситуаций. Разработан алгоритм получения базиса секвентных функций, с помощью которого можно определить (оценить) состояние исследуемого объекта/системы. Предлагается использовать пространственное секвентное преобразование над специальным образом упорядоченными сигналами, поступающими с датчиков. При этом формируется секвентный спектр, который представляется в виде линейной функции с помощью процедуры диагонального упорядочивания пространственных секвент (частот). Анализ получаемых в реальном времени показаний датчиков и оперативное вычисление указанных функций позволяет определять (оценивать), в каком состоянии находится система. Это необходимо, в частности, для своевременного принятия адекватных мер реагирования на возникающие в системах нештатные ситуации. Приведены результаты проведенных вычислительных экспериментов. Они позволяют сделать вывод об эффективности использования разработанного информационно-вычислительного комплекса, его практической применимости для анализа/оценки состояний технических систем в реальном времени.

Ключевые слова: технические системы, датчики, беспроводные сенсорные сети, диагностика, оценка состояния, обработка данных, реальное время, секвентный анализ, выявление скрытых взаимосвязей, распознавание образов, информационно-измерительный комплекс

Графическая аннотация (Graphical annotation)



COMPUTING COMPLEX FOR ANALYZING THE STATES OF A TECHNICAL SYSTEM IN REAL TIME USING WIRELESS SENSOR NETWORKS

The article was received by editorial board on 22.09.2018, in the final version – 20.11.2018.

Rusakov Aleksey M., MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russian Federation,
Senior Lecturer, e-mail: rusal@bk.ru

The article deals with the issues concerning construction of a computer complex using sequential analysis for recognition of technical systems states in real time based on the data received through wireless sensor networks. A computational complex has been designed to detect the regularities in the output signals of sensors using sequential functions. The obtained data are also used to detect abnormal states including exception and alarm situations. An algorithm was developed for obtaining a basis for sequential functions, with the help of which it is possible to determine the state of the object under study. The algorithm uses spatial sequential transformation over specially ordered signals coming from sensors via wireless sensor networks. This helps to form a sequential spectrum, which is represented as a linear function by means of a diagonal procedure for sequencing the spatial sequents (frequencies). The analysis of real-time readings of sensors and the rapid calculation of functions allow to evaluate the system state, which is of great use, in particular, in the fault-detection. The results of computational experiments prove the efficiency of the developed computer complex and its applicability for technical systems states analysis in real time.

Keywords: technical systems, sensors, wireless sensor networks, diagnosis, state evaluation, data processing, real time, sequential analysis, discovery-driven data mining, pattern recognition, information and measuring complex

Введение. В настоящее время наблюдается значительный интерес к беспроводным сенсорным сетям (БСС), которые могут быть использованы в самых разных приложениях [4, 14], включая дистанционный мониторинг параметров окружающей среды; отслеживание положений подвижных объектов; оперативное диагностирование состояния труднодоступных инженерных конструкций. Для отслеживания состояний технических систем (ТС), как при их перемещении, так и в задачах опроса датчиков по БСС, требуется обеспечить сочетание высокой точности и качества передаваемого сигнала [15] с хорошей вычислительной эффективностью алгоритмов его обработки [16]. Особенности обработки поступающих сигналов следующие: ограниченность времени получения данных с датчиков по БСС; необходимость выбора (использования) эффективных по времени вычислений алгоритмов обработки данных; необходимость синхронизации в реальном времени всех «узлов», соответствующих модулям принятия решений или оценки данных мониторинга (диагностики) ТС. Эти особенности требуют разработки специализированных информационно-вычислительных комплексов (ИВК) реального времени. Одним из решений, которое позволяет учесть указанные выше особенности обработки данных, получаемых по БСС, является использование методов секвентного анализа (СА) [13].

Статья посвящена решению задачи формирования ИВК для анализа состояний технических систем в реальном времени с использованием БСС. При этом применяются разработанные автором модели распознавания структурных связей ТС и выявления скрытых закономерностей. Эти модели основаны на использовании разложения выходных сигналов с ТС на секвентный спектр с адаптацией к исследуемому динамическому объекту и условиям его функционирования.

Степень разработанности проблемы анализа состояния технических систем. В общем случае постановка задачи оперативного мониторинга состояний ТС с использованием БСС формулируется следующим образом: распределённая сеть датчиков регистрирует данные в контролируемой зоне, где располагается ТС; по результатам измерений необходимо оперативно, диагностировать состояние ТС, выявить нештатные ситуации. Например, указать положение (пространственное расположение) дефектов в сложной инженерной конструкции, например, такой как промышленная система трубопроводов [6].

Беспроводные сенсорные сети (БСС) – это современные беспроводные системы мониторинга, основанные на международном стандарте IEEE 802.15.04. Он описывает два нижних уровня взаимодействия в открытых системах (Open Systems Interconnection, OSI) – канальный и физический [16]. Остальные уровни описываются с помощью спецификации ZigBee и Thread. В России как программная надстройка стандарта также используется платформа Meshlogic. Основными преимуществами БСС перед другими беспроводными системами мониторинга являются малые экономические затраты и большой ресурс работы элементов системы без замены источников питания, который зачастую и является главным ограничивающим фактором в беспроводных системах мониторинга. Такие системы быстро монтируются, масштабируются и обладают рядом уникальных свойств, позволяющих использовать БСС при мониторинге сложных, опасных и труднодоступных объектов, для которых другие средства мониторинга не удобны и экономически не выгодны. В целом БСС – это очень перспективное направление, которое имеет два основных недостатка – низкая скорость передачи данных не более 250 бит/с (≈ 31 кбайт/с) и ограниченность работы сенсорных узлов, связанная с ресурсом элемента питания, время работы подобных систем измеряется годами [15].

Основным отличием БСС является способ организации взаимодействия между элементами системы. В этих системах передача информации происходит не напрямую от одного элемента к другому (от D_1 к D_n), а через цепочку транзитных элементов – посредников ($D_1, D_2, D_3, \dots, D_i, \dots, D_n$), находящихся в радиусе зоны доступности (R_D), как показано на рисунке 1.

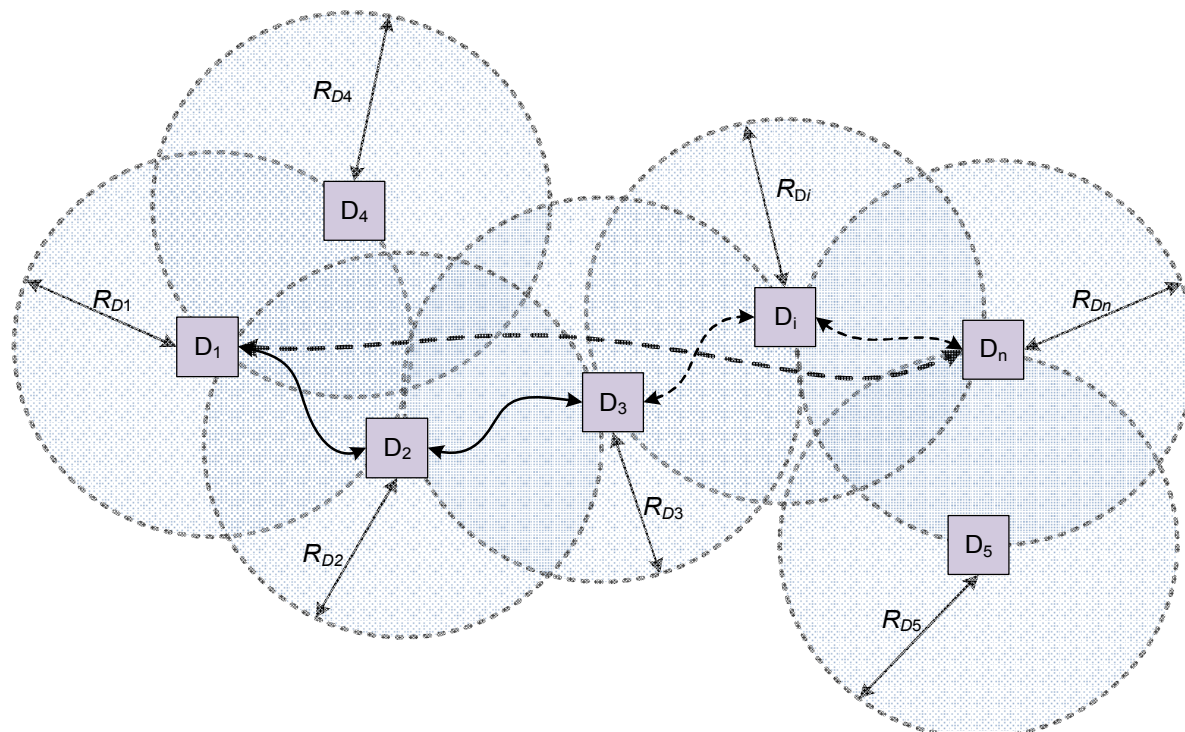


Рисунок 1 – Взаимодействие устройств в БСС

За счёт такого способа передачи данных и достигаются описанные выше уникальные свойства БСС. В простых системах мониторинга, где важно лишь текущее значение измеряемой величины и не учитывается общая динамика происходящего процесса, способ взаимодействия элементов БСС не является ограничивающим фактором. В такой системе хорошо работают традиционные методы телеметрии и современные технологии интеллектуальных датчиков.

Однако для более сложных систем мониторинга требуются сведения об общей динамике процесса и анализирующих показаниях датчиков в их совокупности. Например, в задачах поиска течей технологического трубопровода и других задачах мониторинга, где невозможно провести анализ ситуации, используя показания только одного датчика. Применение БСС к мониторингу состояния сложных, динамически меняющихся или же мало характеризующихся объектов становится затруднительно. Из-за возросшей нагрузки на элементы БСС и повышенной вычислительной сложности используемых алгоритмов общая стоимость использования подобных систем становится на порядок выше по сравнению с традиционными способами мониторинга [16]. Существует два основных пути преодоления данного затруднения: вести обработку информации по пути её следования, либо использовать сложные методы распределённой диагностики [10].

В типовых БСС каждый сенсорный узел состоит из нескольких основных компонентов: радиоприёмопередатчик; память; процессор; аналогово-цифровой преобразователь; источник питания; а также набор датчиков (см. рис. 2).

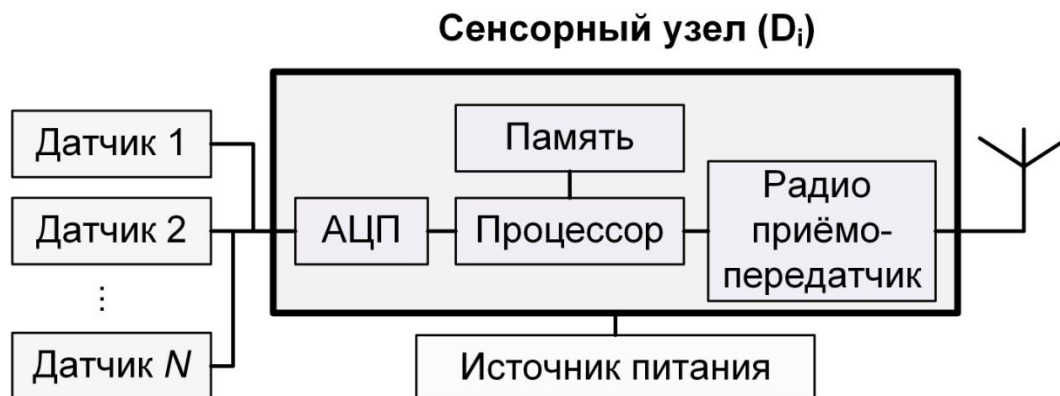


Рисунок 2 – Структурная схема сенсорного узла

Измеряемая величина, получаемая с набора датчиков, подключенных к АЦП сенсорного узла, может иметь различную физическую природу: температура, влажность, звуковое давление и др. На практике в качестве датчиков довольно часто используются различные сенсоры для умного дома [16], а также различные сенсоры промышленного назначения. Большинство датчиков, применяющихся в БСС, выполнены по технологии MEMS. Например, для задачи оперативной диагностики трубопроводных систем были использованы микрофоны типа MEMS [6], которые обеспечивают равномерную частотную характеристику в звуковом диапазоне от 100 Гц до 60 кГц, имеют очень высокую чувствительность, порядка от 42 до 26 дБ относительно (В/Па), т.е. от 8 до 50 мВ/Па. Как правило, частота опроса и количество датчиков определяются поставленной задачей мониторинга. Интервалы опроса датчиков в БСС обычно составляют от 10 с до 6 часов. Причем имеется возможность динамически задавать интервал опроса датчиков в зависимости как от окружающей обстановки, так и централизованно – по команде координирующего центра. Количество сенсорных узлов в БСС обычно не превышает 100. Объем пакета передаваемой информации обычно не превышает 4 кБ. Однако теоретически БСС можно использовать для передачи и мультимедийной информации.

Передача информации в БСС организована на частотах 2,4 ГГц (в мире, нелицензированная частота), 915 МГц (американский континент) и 868 МГц (Европа). На частоте 2,4 ГГц есть 16 каналов ZigBee, каждый канал требует ширины диапазона в 5 МГц.

Технологии БСС удобны для использования в промышленности в задачах мониторинга ТС. Наиболее известные методы оперативной диагностики ТС, которые могут быть также использованы в условиях ограничений БСС, можно условно разделить на следующие группы:

- методы пороговой диагностики;
- методы выявления скрытых закономерностей;
- методы частотно-временного анализа.

Методы статической пороговой диагностики подразумевают сравнение фактических значений параметров с некоторым пороговым значением (уставкой). Эта уставка может выбираться так: эмпирическим путем; с помощью математических вычислений; в результате проведения экспериментальных исследований. Данный метод прост в реализации, используется повсеместно, но имеет ряд существенных недостатков. В частности, при изменении «общей составляющей» процесса происходит множество ложных срабатываний [1] в отношении определения нештатных ситуаций. При этом в некоторых типовых функциях цифровых устройств противоаварийной автоматики уже предусмотрены алгоритмы статических уставок на этапе ввода таких систем в эксплуатацию. Также существует ряд методик для определения порогового значения критерия подобия для экспериментальных данных [3].

Методы выявления скрытых закономерностей строятся на основе применения гибридных методов технологии DataMining [2]. Это дает возможность эффективного использования указанных методов при решении разного рода технических задач, которые в первую очередь направлены на автоматический анализ и выявление скрытых закономерностей в больших объемах данных.

Методы частотно-временного анализа направлены на обнаружение и распознавание измерительных сигналов, в т.ч., возможно, за счет выделения (выявления) информативных признаков таких сигналов в частотно-временной области [5, 7]. Применение подобных методов обработки подразумевает работу с нестационарными сигналами.

Существует целый класс задач оперативной диагностики ТС, для которых не всегда удобно использовать рассмотренные выше методы. На практике некоторые измерительные данные необходимо анализировать в их совокупности, так как единые измерения могут не дать полного представления о наблюдаемых процессах. Например, анализ температурных полей ТС является весьма сложной задачей, решение которой выполняется приближенными методами. Исследователь пытается установить количественную зависимость

между температурой ограниченного числа наиболее ответственных мест ТС и существенными факторами, влияющими на процесс теплообмена. В результате чего может быть пропущен момент образования аномального значения. Для устранения данного недостатка предлагается использовать аппарат СА [12].

Использование секвентного анализа в вычислительном комплексе анализа состояния ТС. Формализуем задачу распознавания структурных связей в ТС на основе СА наблюдаемых процессов. Работа метода распознавания состояний ТС, основанная на использовании методов теории СА, зависит от выбора параметров и, главным образом, от способа задания логических координат и базисных пространственных функций.

При выполнении преобразования пространственного фильтра СА важным является выбор базовых функций, которые, как правило, являются не тригонометрическими. Для ортогональных двумерных функций секвентное преобразование будет обладать свойством обратимости. Во всех остальных случаях появятся погрешности.

В данной работе предлагается ещё один подход к распознаванию состояний, адаптированный для использования в ТС [11, 12]. Суть метода заключается в использовании математического аппарата теории СА [12], позволяющей интерпретировать значения выходных сигналов в их совокупности.

Этот математический аппарат предназначен для реализации различных методов обработки информации с использованием двоичных (бинарных) ортогональных функций, таких как системы обработки аудио- и видеосигналов, а также для использования применительно к несинусоидальным электромагнитным волнам. Характерное достоинство СА – алгоритмы довольно просто реализуются с помощью только двух функций вычитания и сложения.

Предполагается, что исследуемым объектом является «система», состоящая из одной или нескольких взаимодействующих друг с другом ТС. При этом взаимосвязь между внутренними переменными, описывающими состояние ТС, близка по своей структуре:

$$\Psi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l) = \sum_{i=1}^l (c_i \xi_i + \varepsilon_i) + E, \quad (1)$$

где $\Psi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l)$ – некоторая функция взаимосвязи скрытых переменных ξ_i , $i = \overline{1, l}$; c_i – весовой коэффициент; ε и E – относительная и общая аддитивная погрешность.

Пусть влияние погрешностей ε и E на взвешенную сумму (1) невелико ($\varepsilon \rightarrow -\infty$ и $E \rightarrow -\infty$). Кроме того, взаимосвязь между скрытыми переменными соответствует некоторому устойчивому структурному состоянию исследуемой динамической системы (ДС), и эта взаимосвязь неявным образом представлена выходными процессами.

Примем, что в зависимости от поля выходных сигналов $Y_i, \{i = 1, 2, \dots, p\}$ – наблюдаемых процессов «система» находится в различных состояниях $X_i, \{i = 1, 2, \dots, l\}$. Каждому состоянию соответствует некоторая зависимость внутренних неизвестных переменных $\Psi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l)$, которая частично описывает текущую структуру внутрисистемных связей ТС. Требуется распознавать состояние X_i ТС с помощью анализа и поиска взаимосвязей в выходных сигналах $y_i, \{i = 1, 2, \dots, p\}$, без использования тестовых воздействий на входные параметры системы $u_i, \{i = 1, 2, \dots, p\}$.

Основными сложностями распознавания состояний ТС на основе анализа наблюдаемых процессов для рассмотренных систем являются следующие:

- неопределенности в количестве и способах оценки анализируемых сигналов;
- отсутствие универсальных методов обработки информации;
- неинвариантность признаков пространства;
- значительная вычислительная сложность реализации алгоритмов.

Предложено решение данной задачи в виде следующих этапов.

1. Отбор выходных сигналов.
2. Настройка основных параметров.
3. Анализ данных выходных процессов.
4. Интерпретация результатов.

Рассмотрим эти этапы более детально.

1 этап. Отбор выходных сигналов.

Поскольку реальные ТС, удовлетворяющие соотношению (1), имеют взаимосвязи хотя бы по некоторым сигналам y_i , то предлагается выбрать для анализа коррелированные сигналы.

Затем специальным образом эти сигналы упорядочить в рамках использования двумерной системы координат (далее системы логических координат).

Для формирования системы координат (логических координат) необходимо выполнить следующие операции (действия):

- определение положения дефекта на основе особенностей ТС;
- определение дефекта с помощью корреляционных функций.

При этом мы будем учитывать априорные (дополнительные) знания об исследуемой ТС, такие как геометрическое расположение измерительных датчиков, природу регистрируемых сигналов. Кроме того, будем рассчитывать взаимно-корреляционные функции (ВКФ), отсортировать сигналы y_i . В результате получим матрицу (2), в которой соседние элементы имеют максимальные значения корреляции

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{12} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где y_{ij} – выходные сигналы наблюдаемых процессов; i, j – логические координаты расположения измеряемого параметра ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, q = nm$); q – количество анализируемых выходных сигналов; n и m – значения размерностей логической системы координат.

За основу упорядочивания в прямоугольную систему координат был взят геометрический алгоритм Ллойда регуляризации диаграммы Вороного [6], которая в данном случае является позицией сигнала y_i в этой системе.

Поскольку количество анализируемых выходных сигналов конечно, то сортировку сигналов матрицы (2) по ВКФ по строкам и столбцам предлагается выполнить с помощью полного перебора всех вариантов. При этом критерием оптимальности выбранного варианта является условие

$$\text{cov}(y_i, y_j) \rightarrow \max. \quad (3)$$

2 этап. Настройка основных параметров.

Поиск взаимосвязи выходных сигналов предлагается выполнить с помощью методов теории СА. Функция получения секвентного спектра от двумерного отображения значений измеряемых параметров наблюдаемых процессов объекта с размерностью $n \times m$ имеет следующий вид:

$$F_{ij} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\sum_k \sum_l y_{kl} \cdot S_{ij}(k, l) \right), \quad (4)$$

где k, l – логические координаты расположения измеряемого параметра; y_{kl} – значение измеряемой величины для источника измеряемого параметра с логическими координатами k, l ; n, m – размерности логической системы координат; $S_{ij}^{Z_{pq}} = \|Z_{pq}\|^{n \times m}$ – $n \times m$ матрица двумерных пространственных функций Z_{pq} ; p, q – координаты подматрицы значений пространственной функции; i, j – координаты значения S_{ij} в этой функции; $Z_{pq} = \|S_{ij}\|^{n \times m}$ – $n \times m$ матрица значений двумерной пространственной функции; S_{ij} – значения базисной пространственной функции (как правило, в СА это «-1» и «+1»).

3 этап. Подбор параметров секвентного базиса.

Пользуясь основными теоремами СА, можно получить необходимые свойства в секвентном преобразовании с использованием манипулирования секвентным базисом. Получаемый секвентный спектр зависит не только от состава, но и от упорядочивания базовых функций. Поэтому при выборе используемого набора базисных функций в рассматриваемом методе контроля промышленных объектов (для определенности – по акустическому каналу) необходимо учитывать и упорядоченность базовых функций. Рассмотрим известные положения теории СА на примере системы функций Уолша.

По критерию упорядоченности множество функций Уолша обычно разделяют на три группы.

Общеприняты [11, 12] следующие виды упорядочивания: упорядочивание по частности (по Уолшу); диадическое упорядочивание (по Пэли); естественное упорядочивание (по Адамару).

Рассмотрим особенности каждого из этих трех групп упорядочивания.

Упорядочивание по частности (по Уолшу). Будем обозначать множество функций Уолша, упорядоченных таким образом, через

$$S_w = \{wal_w(i, t), i = 0, 1, \dots, N - 1\}, \quad (5)$$

где $N = 2^n, n = 1, 2, 3, \dots$; нижний индекс w означает упорядочение по Уолшу, а i соответствует i -му элементу S_w .

Если через s_i обозначить частность $wal_w(i, t)$, то s_i определяется как

$$s_i = \begin{cases} 0, i = 0; \\ i/2, i - \text{чётное}, \\ (i+1)/2, i - \text{нечётное} \end{cases} \quad (6)$$

Функции cal и sal , соответствующие $wal_w(i, t)$, описываются следующим образом:

$$\begin{aligned} cal(s_i, t) &= wal_w(i, t), i - \text{чётное} \\ sal(s_i, t) &= wal_w(i, t), i - \text{нечётное} \end{aligned} \quad (7)$$

Диадическое упорядочение или упорядочение по Пэли. Функции Уолша являются элементами диадической группы и могут быть упорядочены с помощью кода Грея [12]. Данное множество функций обозначается как

$$S_p = \{wal_p(i, t), i = 0, 1, \dots, N-1\} \quad (8)$$

где индекс p означает упорядочивание по Пэли, а i означает i -й элемент S_p .

Множество S_p связано с множеством S_w упорядоченным по Уолшу, соотношением

$$wal_p(i, t) = wal_w(b(i), t), \quad (9)$$

где $b(i)$ – переход от кода Грея к двоичному коду с индексом i .

Естественное упорядочивание или упорядочивание по Адамару. Множество функций Уолша обозначается следующим образом:

$$S_h = \{wal_h(i, t), i = 0, 1, \dots, N-1\}, \quad (10)$$

где индекс h означает упорядочивание по Адамару, а i означает i -й элемент S_h .

Функции, принадлежащие S_h , связаны функциями, упорядоченными по Уолшу, соотношением

$$wal_h(i, t) = wal_w(\langle i \rangle, t), \quad (11)$$

где $\langle i \rangle$ – двоично-инвертированная запись i , а $b(\langle i \rangle)$ – переход от кода Грея к двоичному коду $\langle i \rangle$.

Другими словами, естественное упорядочивание совпадает с естественным упорядочением в матрице Адамара.

Также известно, что при использовании в качестве базисных функций функции Уолша в секвентном обобщённом преобразовании оно сводится к преобразованию Уолша-Адамара (ПУА). Таким образом, ПУА является частным случаем обобщённого преобразования СА [11, 12].

Энергетический спектр ПУА, упорядоченного по Адамару (аналогично упорядочиванию по Пэли), имеет следующие физические интерпретации:

- спектральные точки $P_h(r)$ представляют собой средние энергии множества $(n+1)$ взаимно ортогональных подпоследовательностей;
- каждая точка $P_h(r)$ представляет собой энергетическое содержание группы частных спектра ПУА с упорядочиванием по Адамару, обладающим свойством инвариантности относительно циклических сдвигов исходной последовательности. В случае энергетического спектра ПУА с упорядочиванием по Уолшу это одна частность.

Спектр с упорядочиванием по Уолшу также определяется как сумма квадратов коэффициентов при функциях cal и sal в разложении последовательности в ряд Уолша. Это соответствует коэффициентам при косинусах и синусах в разложении в конечный ряд Фурье. Таким образом, можно сравнить его свойства со свойствами преобразования Фурье [7].

4 этап. Интерпретация результатов секвентного преобразования.

Для последующей обработки секвентного спектра, полученного в результате использования (4), необходимо интерпретировать полученный спектр. Для удобства сравнения секвентных спектров используется процедура его диагонализации. Пример процедуры диагонализации представлен на рисунке 3. Начиная с элемента 11 и последовательно двигаясь параллельно побочной диагонали попеременно перемещаясь вверх и вниз, получаем следующую последовательность: 11, 12, 21, 22, 31, 13, 23, 32, 14, 41, 33, 24, 42, 15, 51, 34, 43, 25, 52, Здесь n, m – размерности логической системы координат. Далее полученные последовательности анализируются и сравниваются.

11	12	13	14	15	16	...	1n
21	22	23	24	25	26	...	2n
31	32	33	34	35	36	...	3n
41	42	43	44	45	46	...	4n
51	52	53	54	55	56	...	5n
...
m1	m2	m3	m4	m5	m6	...	mn

Рисунок 3 – Процедура диагонализации двумерного секвентного спектра в линейную форму

Использование секвентного преобразования для анализа данных, получаемых по беспроводным сенсорным сетям. Предлагается использовать идею пространственного фильтра СА [11]. Не нарушая общности, будем считать, что контролируемое пространство имеет прямоугольную форму. В СА функция получения пространственного секвентного спектра прямоугольного изображения $n \times m$ имеет следующий вид:

$$X(i, j) = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^m x(i, j) \cdot S_{z(i,j)}^{(p,q)}, \quad (12)$$

где i, j – координаты измерительного узла, выходного сигнала или датчика (далее по тексту – измерительного узла); $S_{z(i,j)}^{(p,q)}$ – ортогональная двумерная пространственная функция Z (например, функции Уолша, Хаара, Радемахера и др. [12]); p, q – координаты точки пространственной функции; n, m – размерности двумерных координат.

Определим наличие коррелируемых фоновых шумов и сопоставим им соответствующие участки контролируемой ТС. К таким участкам можно отнести, например, контролируемые пространства, находящиеся в одном помещении или же отдельно стоящие контролируемые объекты, для которых используется большое количество расположенных рядом измерительных узлов. Это удобнее сделать, учитывая особенности симметрии и концентрации возможных дефектов на контролируемой ТС.

Введём систему координат, учитывающую индивидуальные геометрические особенности обследуемого объекта (см. рис. 4). Каждому измерительному узлу с логическими координатами i, j зададим (сопоставим) матрицу M_{stat} размерности $m \times n$. Назовем её **статической секвентной матрицей** и запишем в неё коэффициенты для преобразования по формуле (12), т.е. $M_{stat}^{(i,j)} = S_z^{(i,j)}$.

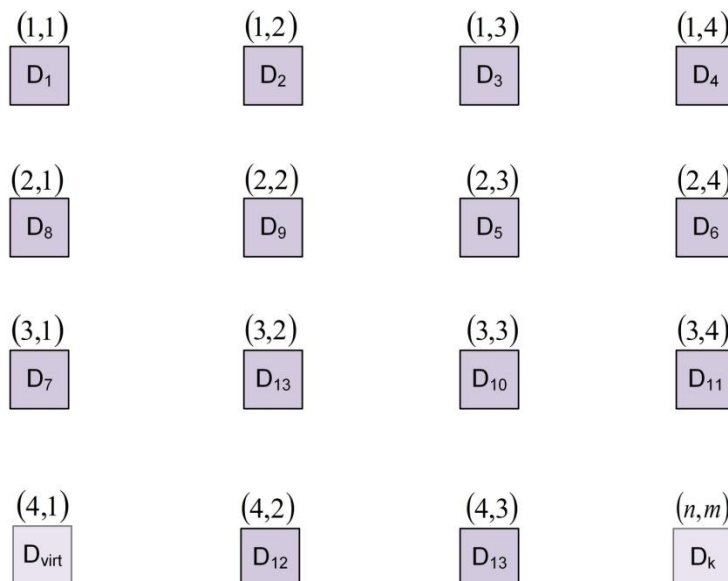


Рисунок 4 – Задание логических координат

Перепишем формулу (5) в следующем виде:

$$X = \frac{1}{m \cdot n} \left(M_{stat}^{(1,1)} \cdot x(1,1) + M_{stat}^{(1,2)} \cdot x(1,2) + M_{stat}^{(i,j)} \cdot x(i,j) + \dots + M_{stat}^{(n,n)} \cdot x(n,n) \right), \quad (13)$$

где i, j – координаты измерительного узла ТС.

Отметим, что перемножение элементов $M_{stat}^{(i,j)} \cdot x(i,j)$ в (13) для большинства пространственных функций в СА сводится к простой смене знака. Теперь обозначим выражение $M_{stat}^{(i,j)} \cdot x(i,j)$ как $M_{dyn}^{(i,j)}$ и назовём его **динамической секвентной матрицей**.

Перепишем формулу (13) в следующем виде:

$$X = \frac{1}{n \cdot m} \left(M_{dyn}^{(1,1)} + M_{dyn}^{(1,2)} + \dots + M_{dyn}^{(i,j)} + \dots + M_{dyn}^{(n,m)} \right), \quad (14)$$

где $M_{dyn}^{(i,j)} = M_{stat}^{(i,j)} \cdot x(i,j)$ – динамическая секвентная матрица для измерительного узла с координатами i, j .

На примере трёх датчиков опишем процесс передачи информации от одного узла ТС к другому, так чтобы прямое секвентное преобразование (7) выполнялось по пути следования информации.

Пусть у датчика D_a координаты (k,l) , D_b – (i,j) , у D_c – (p,q) . Каждому из этих датчиков зададим статическую секвентную матрицу $M_{stat}^{(k,l)}$, $M_{stat}^{(i,j)}$, $M_{stat}^{(p,q)}$ соответственно. В заранее определённый момент времени (определяемый по таймеру) на каждом датчике сформируем динамическую секвентную матрицу для передачи $M_{dyn}^{(k,l)} = M_{stat}^{(k,l)} \cdot x(k,l)$, $M_{dyn}^{(i,j)} = M_{stat}^{(i,j)} \cdot x(i,j)$, $M_{dyn}^{(p,q)} = M_{stat}^{(p,q)} \cdot x(p,q)$, где $x(k,l)$, $x(i,j)$ и $x(p,q)$ – показания датчиков D_a , D_b и D_c . Начнём процесс передачи данных с датчика D_a . Перешлём данные с датчика D_a на D_b . На датчике D_b сложим матрицы $M_{dyn}^{(k,l)}$ с $M_{dyn}^{(i,j)}$ и перешлём полученную матрицу на датчик D_c . На D_c сложим матрицы $M_{dyn}^{(i,j)}$ с $M_{dyn}^{(p,q)}$ и перешлём далее, как показано на рисунке 5.

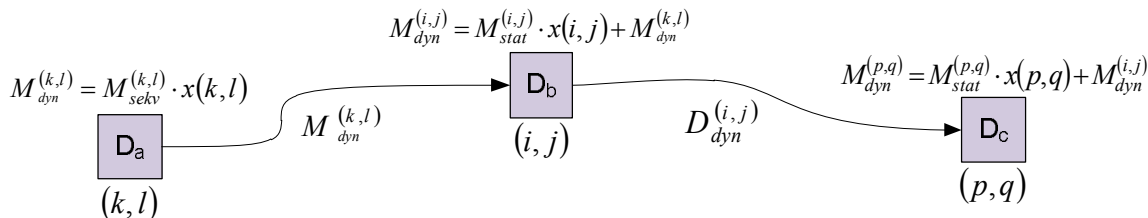


Рисунок 5 – Процесс передачи данных в виде передачи секвентных матриц

Отметим, что показания датчиков должны входить в сумму (14) только по одному разу. Поэтому необходимо пометить датчики, которые уже отослали данные, а также заранее задавать (возможно, даже на этапе проектирования системы мониторинга) расписание и направление сбора информации. При поступлении всей информации в центр обработки информации её необходимо умножить на коэффициент «1/(nm)». Полученная матрица будет пространственным секвентным спектром активности показаний датчиков. Обратное преобразование в показания датчиков можно выполнить по

$$x(i,j) = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^m X(p,q) \cdot S_{Z(i,j)}^{(p,q)}, \quad (19)$$

где $X(p,q)$ – значения точки пространственного секвентного спектра с координатами (p,q) .

При формировании пространственного спектра можно использовать разные пространственные функции. Отметим, что для некоторых случаев удобнее использовать наборы секвентных матриц. Для осуществления общего контроля за состоянием ТС предлагается использовать специальным образом синтезируемые двумерные функции Уолша.

По аналогии с обработкой изображений можно использовать не все значения статической секвентной матрицы, а только некоторую часть. Это приводит к тому, что обратное преобразование выполняется с погрешностями. Однако при этом сокращается вычислительная сложность алгоритма. Кроме того, данный подход позволяет учитывать возможные задержки сети при передаче данных.

Таким образом, для обнаружения дефектов ТС можно использовать секвентный спектр и по нему определять их наличие. Традиционно в теории распознавании образов выделяют два этапа: форми-

рование признаков и решающую процедуру [13, 3]. Разработанный ранее метод на основе СА предлагается использовать для формирования признаков. В результате применения СА к выходным данным, анализируемые значения характеристик могут иметь (допускать) физическую интерпретацию. Для решающей процедуры о переходе ТС из одного состояния в другое используется часть теории распознавания образов, относящаяся к построению эффективных решающих функций (правил) согласно [3]. Для данной задачи решающую функцию (или, другими словами, общую диагностическую функцию) можно записать в следующем виде:

$$D_{\text{диаг}} = \max(k_{(p,q)} \cdot |X(p,q)|) \geq H, \quad (15)$$

где $X(p,q)$ – значения пространственной секвенты с координатами (p,q) ; $k_{(p,q)}$ – нормирующий (калибрующий коэффициент) для пространственной секвенты; H – пороговое значение. При превышении порогового значения даётся заключение о наличии источника шума, т.е. дефекта.

При этом нормирующие коэффициенты $k_{(p,q)}$ для произвольной пространственной секвенты (p,q) можно подобрать, используя понятие частности СА.

В результате указанных операций измерительные узлы для ТС также определяют наличие дефектов. Таким образом, используя предложенный подход совместно с алгоритмами распознавания, становится возможным обосновывать получаемые характеристики и более точно диагностировать состояние ТС в реальном времени.

Характеристика программных средств информационно-вычислительного комплекса. Программный продукт, используемый в ИВК, обеспечивает следующую совокупность функций: загрузка данных; исследование (оценка) состояний ТС путем определения возможно существующих дефектов на основе формирования базисных секвентных функций.

ИВК реализован в виде набора модулей. Часть их написана в математической среде программирования MATLAB, другие модули написаны на языке программирования C#. По объему кода часть ИВК, написанная на MATLAB, занимает порядка 1500 строк (без учета вспомогательных графических элементов). Объем кода на C# составляет порядка 1000 строк. Модуль на C# выполнен в виде консольного приложения. Модули на MATLAB реализованы с использованием графических интерфейсов подсистемы GUIDE, без использования коммерческих библиотек (тулбоксов).

Обобщенная структурная схема программного обеспечения для разработанного ИВК представлена на рисунке 6.

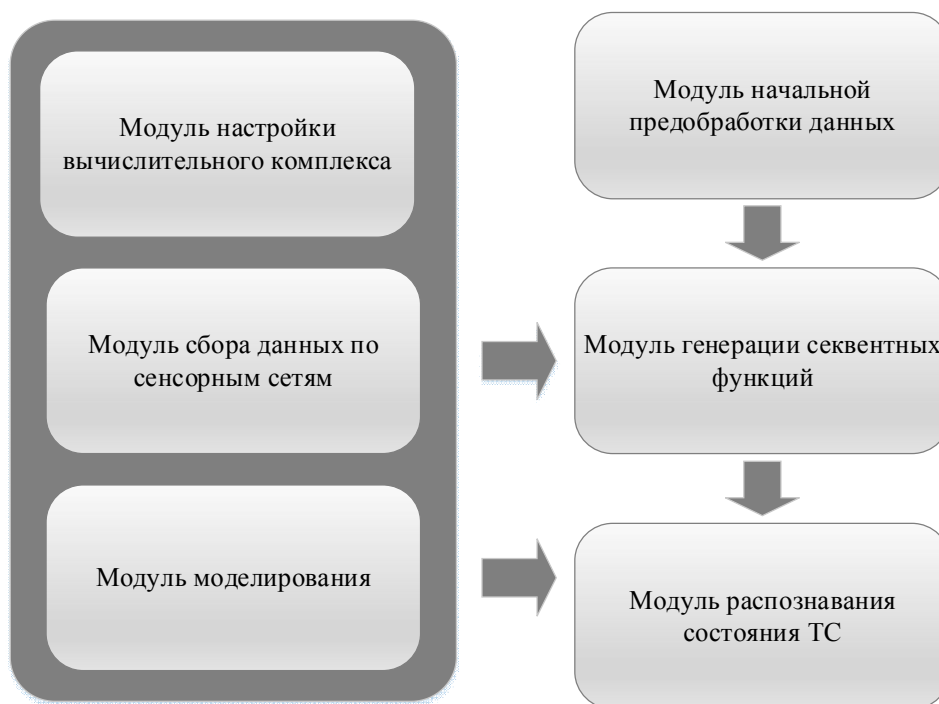


Рисунок 6 – Обобщенная структурная схема разработанного программного комплекса для ИВК

Алгоритм подбора секвентного базиса представлен на рисунке 7.

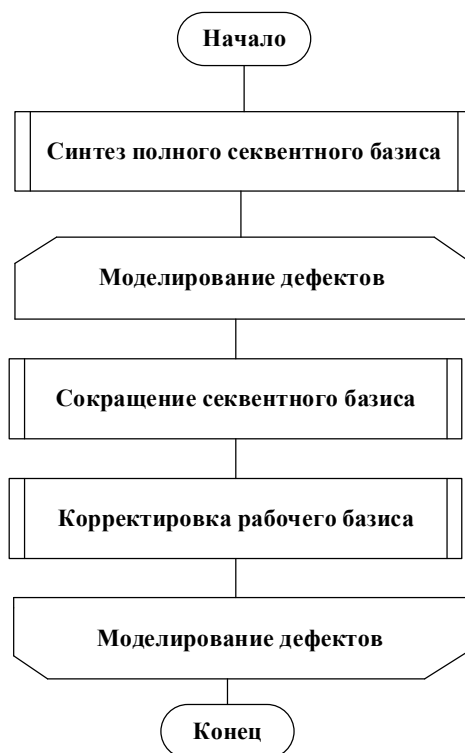


Рисунок 7 – Схема алгоритма подбора секвентного базиса

Сначала выполняется синтез полного секвентного базиса. Так как он занимает продолжительное время, то соответствующие вычисления проводятся заранее для четного числа каналов. При этом начиная с 12-ти каналов приема-передачи данных по БСС синтез секвентного базиса необходимо проводить на вычислительных кластерах – с целью «распараллеливания» вычислений. Далее с помощью математического моделирования дефектов последовательным образом выполняется подстройка – сокращение полного секвентного базиса до рабочего базиса, в котором содержатся только наиболее информационно значимые (информативные) базисные функции.

Моделирование выполняется для одного и двух одновременных аномальных значений. При этом предполагается, что вероятность появления одновременно трех и более аномальных значений бесконечно мала и может не приниматься во внимание. Полученный секвентный базис используется как рабочий базис для выполнения основного преобразования секвентного фильтра. Предполагается, что искомый рабочий базис наиболее полно описывает поведение контролируемого объекта.

Сокращение секвентного базиса до рабочего базиса выполняется так, как показано на рисунке 7. Изначально рабочий базис содержит в себе все секвентные функции из полного базиса. Далее выполняется подбор всех возможных секвентных функций из полного базиса по критерию оценки наибольшей пригодности этих функций для обнаружения всей совокупности моделируемых аномальных значений. Если текущая оценка больше предыдущей, то предыдущая функция малоинформативна и она подлежит исключению из секвентного базиса.

Пример вычислений. На рисунке 8 представлен пример результатов генерации тестовых данных для исследования состояний ТС. В качестве тестовых данных используются данные, имитирующие показания температуры внешней части нефтеперегонной установки. Слева на рисунке 8 показан трехмерный график значений температуры установки, справа – сами значения. Аномальным значением в данном случае будет считаться значение, превышающее определенную пороговую величину. Существующие методы позволяют оценить данное состояние ТС достаточно грубо [1, 2, 4]. Предложенный метод на основе СА определяет момент появления аномального значения точнее. При описании поведения ТС могут быть использованы данные, полученные для различных состояний ТС и учитывающие её поведенческие особенности.

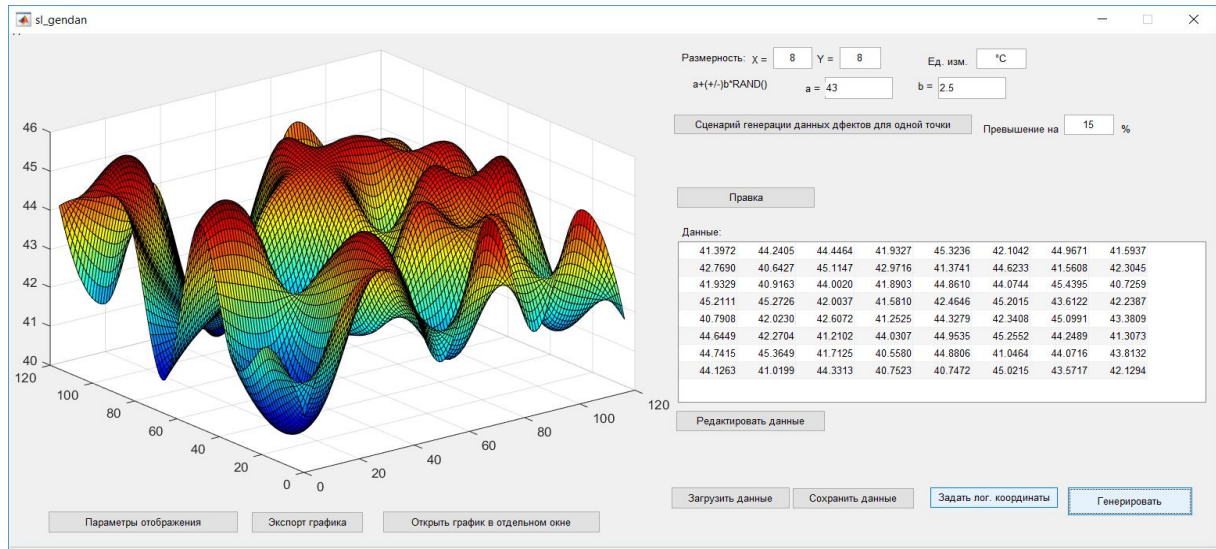


Рисунок 8 – Интерфейс модуля генерации тестовых данных для исследования состояний ТС

Пример работы программного модуля СА выходных сигналов представлен на рисунке 9. На нем показан результат анализа состояния ТС в момент появления аномального значения. Слева на рисунке приведен трехмерный график значений температуры установки. Справа – пространственный секвентный спектр. Под графиками отображены значения данных, использованных для точек графиков.

При визуальном просмотре секвентного спектра довольно сложно определить наличие или отсутствие дефекта. Поэтому в предложенном ИВК выводится специального вида одномерный секвентный спектр.

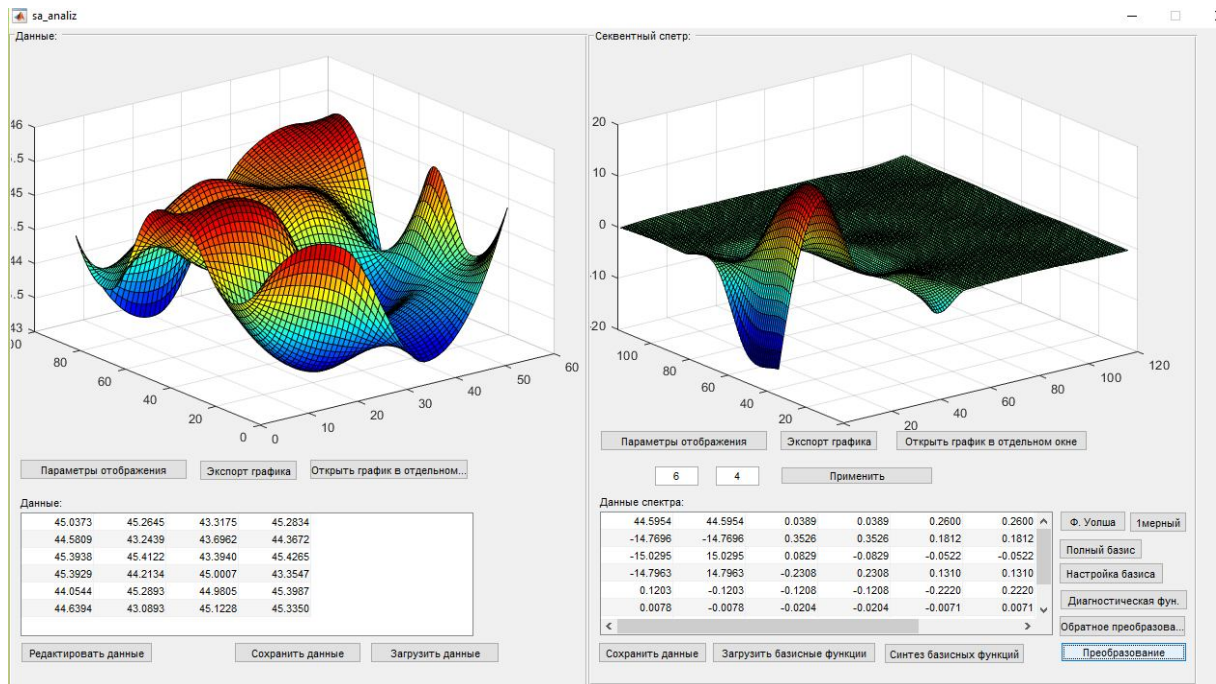


Рисунок 9 – Результаты работы модуля СА выходных сигналов

На основе модели данных серии дефектов определяются соотношения, на базе которых строится базис секвентных ортогональных функций. С помощью полученного секвентного базиса рассчитывается секвентный спектр. Потом с помощью процедуры диагонализации строится одномерный секвентный спектр. Фрагмент полученного одномерного секвентного спектра представлен на рисунке 10.

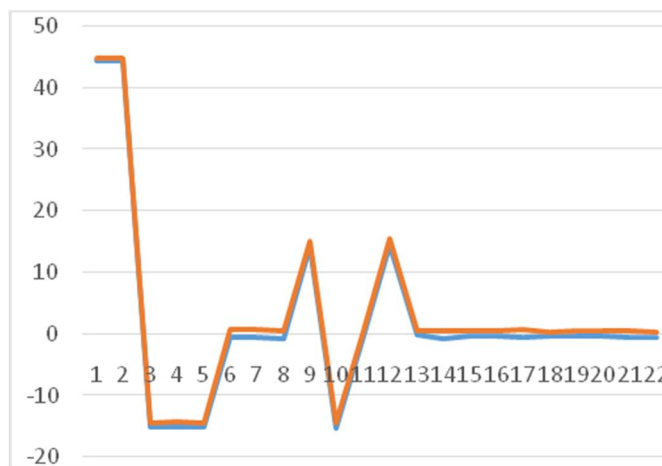


Рисунок 10 – Фрагмент упорядоченного секвентного спектра на основе процедуры диагонализации (при отсутствии дефекта)

На рисунке 10 приведен график специального вида для одномерного секвентного спектра. По оси x на рисунке 10 (и последующем) приведены значения пространственных частот. По оси y отображены сами значения пространственных частот.

Анализируя рисунок 10, можно определить момент возникновения дефекта. На нем красной линией показаны значения секвентного спектра в текущем состоянии ТС (по анализу выходных процессов). Синяя и зеленая линии (рис. 10) отображают возможные состояния ТС без дефектов.

Экран (вид интерфейса) при распознавании состояний ТС в случае наличия дефекта представлен на рисунке 11.

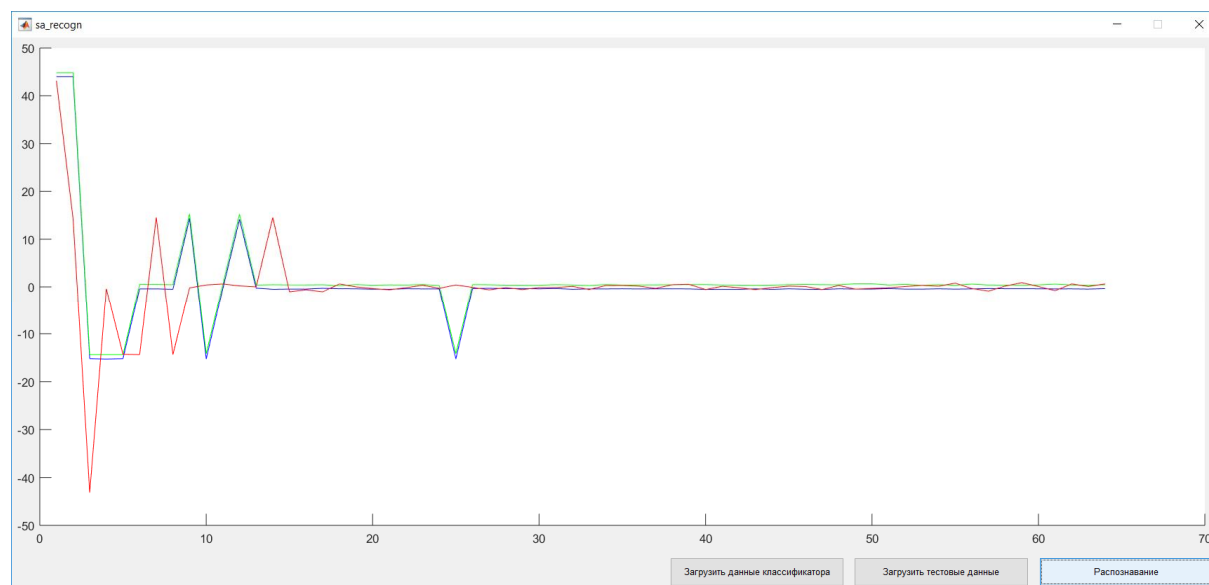


Рисунок 11 – Фрагмент упорядоченного секвентного спектра, полученного на основе использования процедуры диагонализации (при наличии дефекта)

На этом рисунке красным цветом показан одномерный секвентный спектр с данными дефекта. Таким образом, красная линия показывает анализируемое состояние ТС. Синяя и зеленая линии показывают возможные состояния ТС без дефекта.

Если красная линия близка к зеленой и синей, то можно с определенной достоверностью заключить, что анализируемые данные не содержат дефекта.

Видно, что на рисунке 11 красная линия смещена от зеленой и синей линий. При этом пики и впадины на графике для красной линии отличаются по сравнению с зеленой и синей линиями. Таким образом, можно заключить, что в представленные данные отражают наличие дефекта.

Получаемый секвентный базис не является, строго говоря, ортогональным (см. этап 3). Поэтому определить статистическую достоверность заключений достаточно сложно. Однако на практике полу-

ченных графиков с результатами анализа наблюдаемых процессов (рис. 10, 11) обычно достаточно для того, чтобы определять, в каком состоянии находится ТС [6].

Выводы. Разработан информационно-вычислительный комплекс для распознавания структурных связей ТС на основе выявления скрытых закономерностей с помощью разложения выходных сигналов на секвентный спектр (с адаптацией к исследуемому динамическому объекту).

Предложены модели, ориентированные на использование теории СА для распознавания состояний ТС, включающие использование метода адаптации секвентного базиса (сокращения базиса) и разработку метода наглядной визуализации состояний ТС. Обоснована целесообразность использования метода синтеза базисных пространственных секвентных функций.

Сформированный информационно-вычислительный комплекс был апробирован на тестовых данных, имитирующих показания температуры внешней части нефтеперегонной установки. Полученные результаты позволяют сделать вывод о применимости ИВК для оценки состояний ТС в реальном времени в отношении наличия или отсутствия дефектов в таких системах.

Список литературы

1. Алексеев А. А. Идентификация и диагностика систем / А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопалов. – Москва : Академия, 2009.
2. Берестнева О. Г., Пеккер Я. С. Выявление скрытых закономерностей в сложных системах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2009. – Т. 315, № 5.
3. Глинский В. В. Об оценке пороговых значений в решении задачи классификации данных / В. В. Глинский, Л. К. Серга, Е. Ю. Чemezova, К. А. Зайков // Вопросы статистики. – 2014. – № 12. – С. 30–36.
4. Кочнев С. В., Лапсарь А. П. Параметрический подход к оценке состояния сложных технических объектов на основе эволюционных уравнений / С. В. Кочнев, А. П. Лапсарь // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 2 (38). – С. 10–18 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(38\)/10-18.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(38)/10-18.pdf)).
5. Крянев А. Метрический анализ и обработка данных / А. Крянев, Г. Лукин, У. Давид. – Litres, 2017.
6. Русаков А. М. Оперативная радиоакустическая диагностика промышленных трубопроводных систем / А. М. Русаков // Cloud of science. – 2014. – Vol. 1, № 4. – P. 607–634.
7. Antoniou A. Digital signal processing / A. Antoniou. – McGraw-Hill, 2016.
8. Darabkh K. A. Improved clustering algorithms for target tracking in wireless sensor networks / K. A. Darabkh, W. Y. Albtoosh, I. F. Jafar // The Journal of Supercomputing. – 2017. – Vol. 73, № 5. – P. 1952–1977.
9. Duda R. O. Pattern Classification and Scene Analysis. Part 1: Pattern Classification / R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. – Chichester : Wiley, 2000.
10. Han J. Smart home energy management system including renewable energy based on ZigBee and PLC / J. Han et al. // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2014. – Vol. 60, № 2. – P. 198–202.
11. Harmuth H. F. Antennas and waveguides for nonsinusoidal waves // Advances in Electronics and Electron Physics Supplement. – 1984. – Vol. 1.
12. Harmuth H. F. Transmission of information by orthogonal functions / H. F. Harmuth. – Springer Science & Business Media, 2012.
13. Ho J. W. Fast detection of replica node attacks in mobile sensor networks using sequential analysis / J. W. Ho, M. Wright, S. K. Das // IEEE INFOCOM 2009. – IEEE Publ., 2009. – P. 1773–1781.
14. Jesus G., Casimiro A., Oliveira A. A survey on data quality for dependable monitoring in wireless sensor networks / G. Jesus, A. Casimiro, A. Oliveira // Sensors. – 2017. – Vol. 17, № 9. – P. 2010.
15. Khan W. Z. Detection and mitigation of node replication attacks in wireless sensor networks: a survey / W. Z. Khan, M. Y. Aalsalem, M. N. B. M. Saad, Y. Xiang // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2013. – Vol. 9, № 5. – P. 149023.
16. Roberto Sandre. Thread and ZigBee for home and building automation / Roberto Sandre. – Texas : Texas Instruments, 2018.

References

1. Alekseev A. A., Korablev Yu. A., Shestopalov M. Yu. *Identifikatsiya i diagnostika sistem* [Identification and diagnostics of systems]. Moscow, Akademiya Publ., 2009.
2. Berestneva O. G., Pekker Ya. S. Vyyavlenie skrytykh zakonornostey v slozhnykh sistemakh [Revealing hidden regularities in complex systems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering georesources], 2009, vol. 315, no. 5.
3. Glinkiy V. V., Serga L. K., Chemezova Ye. Yu., Zaykov K. A. Ob otsenke porogovykh znacheniy v reshenii zadachi klassifikatsii dannykh [On the estimation of threshold values in solving the problem of classification of data]. *Statistical issues* [Voprosy statistiki], 2014, no. 12, pp. 30–36.
4. Kochnev S. V., Lapsar A.P. Parametricheskij podkhod k otsenke sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh obektov na osnove evolyutsionnykh uravneniy [Parametric approach to assess the state of complex technical objects on the basis of evolution equations]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian journal: control and high technologies], 2017, no. 2 (38), pp. 10–18 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(38\)/10-18.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(38)/10-18.pdf)).
5. Kryanov A., Lukin G., David U. *Metricheskij analiz i obrabotka dannykh* [Metric analysis and data processing]. Litres, 2017.
6. Rusakov A. M. Operativnaya radioakusticheskaya diagnostika promyshlennykh truboprovodnykh sistem [Operational radioacoustic diagnostics of industrial pipeline systems]. *Cloud of science*, 2014, vol. 1, no. 4, pp. 607–634.

7. Antoniou A. *Digital signal processing*. – McGraw-Hill, 2016.
8. Darabkh K. A., Albtoosh W. Y., Jafar I. F. Improved clustering algorithms for target tracking in wireless sensor networks. *The Journal of Supercomputing*, 2017, vol. 73, no. 5, pp. 1952–1977.
9. Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. *Pattern Classification and Scene Analysis. Part 1: Pattern Classification*. Chichester, Wiley, 2000.
10. Han J. et al. Smart home energy management system including renewable energy based on ZigBee and PLC. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2014, vol. 60, no. 2, pp. 198–202.
11. Harmuth H. F. Antennas and waveguides for nonsinusoidal waves. *Advances in Electronics and Electron Physics Supplement*, 1984, vol. 1.
12. Harmuth H. F. *Transmission of information by orthogonal functions*. Springer Science & Business Media, 2012.
13. Ho J. W., Wright M., Das S. K. Fast detection of replica node attacks in mobile sensor networks using sequential analysis. *INFOCOM 2009*, IEEE Publ., 2009, pp. 1773–1781.
14. Jesus G., Casimiro A., Oliveira A. A survey on data quality for dependable monitoring in wireless sensor networks. *Sensors*, 2010, vol. 17, no. 9, p. 2010.
15. Khan W. Z., Aalsalem M. Y., Saad M. N. B. M., Xiang Y. Detection and mitigation of node replication attacks in wireless sensor networks: a survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, vol. 9, no. 5, p. 149023.
16. Roberto Sandre. *Thread and ZigBee for home and building automation*. Texas, Texas Instruments, 2018.

УДК 004.932.72

РАЗРАБОТКА ТИПОВЫХ МЕТОДОВ УСТАНОВКИ ВИДЕОКАМЕР СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ КОНЕЧНОГО УЧАСТКА ТРАЕКТОРИИ ОБЪЕКТА НАБЛЮДЕНИЯ

Статья поступила в редакцию 10.11.2018, в окончательном варианте 20.11.2018.

Волотов Евгений Михайлович, филиал «Взлет» Московского авиационного института, 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5, кандидат технических наук, e-mail: volotovevgenii@gmail.com

Нестеров Сергей Васильевич, филиал «Взлет» Московского авиационного института, 416501, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5, кандидат технических наук

Митрофанов Игорь Викторович, войсковая часть 15650, 416507, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск-7, кандидат технических наук

Кокорина Светлана Борисовна, войсковая часть 15650, 416507, Российская Федерация, Астраханская область, г. Ахтубинск-7.

соискатель ученой степени кандидата технических наук, инженер

Митрофанов Евгений Игоревич, ЗАО «Технологический Парк Космонавтики «Линкос», 142172, Российская Федерация, г. Москва, г. Щербинка, ул. Дорожная, 5, соискатель ученой степени кандидата технических наук, инженер

Существует множество методов получения количественных параметров регистрируемых процессов для движущихся объектов: угломерный, угломерно-дальномерный, дальномерный и др. Наиболее широкое применение получил угломерный метод, который основан на синхронных измерениях угловых направлений на объект наблюдения по азимуту и углу места с нескольких (не менее чем с двух) видеокамер. Однако в этом случае траекторные параметры объекта наблюдения будут определены с некоторыми ошибками. Задача состоит в том, чтобы установить видеокамеры для отслеживания движения объекта наблюдения таким образом, чтобы минимизировать ошибку определения его местоположения при использовании угломерного метода определения координат. Предложенные в данной статье типовые методы позволяют получать траекторные параметры объекта наблюдения с минимальной ошибкой и могут быть эффективно использованы в процессах испытаний авиационной техники и вооружений. В результате разработанные (предложенные) типовые методы установки видеокамер системы регистрации конечного участка траектории объекта наблюдения позволяют более рационально организовать процесс регистрации, усовершенствовать информационное обеспечение и сократить сроки испытаний.

Ключевые слова: объект наблюдения, система регистрации, траекторные параметры, видеокамеры общего назначения, угломерный метод, погрешность определения прямоугольных координат, информационные технологии