

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 1 (61)

2022

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- Макарычев П. П., Шибанов С. В., Афонин А. Ю.* Постановка
и решение задачи идентификации методом регрессионного анализа..... 3
- Полосин В. Г.* Мощность энтропийно-параметрического критерия проверки
статистических гипотез для систем управления и обработки информации 20
- Бабич М. Ю.* Искусственный интеллект и создание сложных
организационно-технических систем (Часть II)..... 32
- Маньков Е. А.* Аналитические модели временных характеристик
процессов перехвата речевой информации и контроля
защищенности речевой информации от утечки
по техническим каналам на объектах информатизации 42
- Иванов А. И., Малыгин А. Ю., Полковникова С. А.* Удвоение числа
статистических критериев семейства Крамера – фон Мизеса
дифференцированием малых выборок с нормальным
и равномерным распределением биометрических данных 53
- Каев В. Ю., Дубинин В. Н., Дубинин А. В., Климкина Л. П.*
Моделирование раскрашенных сетей Петри
с использованием технологий семантического web 62
- Бурукина И. П., Привалов А. Э.* Исследование современных
подходов к проектированию цифровых интерфейсов 78

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

- Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Самохина К. С., Бадеев А. В.,
Толова А. А.* Оптико-электронные информационно-измерительные
системы определения абсолютного положения объекта 88
- Попов Д. И.* Обнаружение когерентно-импульсных
многочастотных сигналов 101

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 1 (61)

2022

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

<i>Makarychev P. P., Shibanov S. V., Afonin A. Yu.</i> Statement and solution of the identification problem of regression analysis method	3
<i>Polosin V.G.</i> The power of the entropy-parametric criterion for testing statistical hypotheses in control systems and information processing	20
<i>Babich M. Yu.</i> Artificial intelligence and creation of complex organizational and technical systems (Part 2).....	32
<i>Man'kov E.A.</i> Analytical models of temporal characteristics of the intercepting speech information's processes and monitoring the speech information's protection from leakage through technical channels at informatization facilities	42
<i>Ivanov A.I., Malygin A. Yu., Polkovnikova S.A.</i> Doubling the number of statistical Cramer – von Mises criterion by differentiating small samples with normal and uniform distribution of biometric data	53
<i>Kaev V. Yu., Dubinin V.N., Dubinin A.V., Klimkina L.P.</i> Modeling of colored Petri nets using semantic Web technologies.....	62
<i>Burukina I.P., Privalov A.E.</i> Contemporary approaches to digital interface design.....	78

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

<i>Murashkina T.I., Badeeva E.A., Samokhina K.S., Badeev A.V., Tolova A.A.</i> Optoelectronic information-measuring systems for determining the absolute position of an object	88
<i>Popov D.I.</i> Detection of coherent-pulse multi-frequency signals	101

**ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

УДК 681.5.015.4

doi:10.21685/2072-3059-2022-1-1

**Постановка и решение задачи идентификации
методом регрессионного анализа**

П. П. Макарычев¹, С. В. Шибанов², А. Ю. Афонин³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹makpp@yandex.ru, ²serega@pnzgu.ru, ³afonin@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются дискретные и непрерывные модели нелинейных динамических объектов. Предметом исследования является метод построения моделей с применением прямого и обратного преобразования Лапласа, декомпозиции модели на линейную и нелинейную составляющие, декомпозиции линейной части модели на входную и выходную составляющие. Цель работы – разработка метода, обеспечивающего построение как дискретных, так и непрерывных моделей динамических нелинейных объектов для решения задач структурной и параметрической идентификации параметров методом регрессионного анализа временных рядов по результатам регистрации значений входного и выходного сигналов с заданным интервалом времени. *Материалы и методы.* При разработке метода идентификации структур и параметров моделей динамических объектов использованы основные положения теории систем, прямого и обратного преобразования Лапласа, теории построения дискретных моделей, регрессионного и системного анализа временных рядов. *Результаты.* Разработан метод идентификации структур, параметров дискретных и непрерывных моделей объектов с применением регрессионного анализа. При идентификации моделей метод обеспечивает поиск количества и значений полюсов, нулей передаточной функции, коэффициентов нелинейности объекта по критерию минимума среднеквадратичного отклонения рассчитанных значений от зарегистрированных значений выходного сигнала. *Выводы.* Метод обеспечивает идентификацию структуры и параметров дискретных и непрерывных моделей по критерию минимума среднеквадратичного отклонения зарегистрированных и рассчитанных значений выходного сигнала. Применение метода построения и преобразования моделей возможно в сочетании с различными способами интегрирования временных рядов.

Ключевые слова: нелинейный динамический объект, параметрическая идентификация, регрессионный анализ, дискретная и непрерывная модели объекта

Для цитирования: Макарычев П. П., Шибанов С. В., Афонин А. Ю. Постановка и решение задачи идентификации методом регрессионного анализа // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 3–19. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-1

Statement and solution of the identification problem of regression analysis method

P.P. Makarychev¹, S.V. Shibanov², A.Yu. Afonin³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹makpp@yandex.ru, ²serega@pnzgu.ru, ³afonin@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is discrete and continuous models of nonlinear dynamic objects. The subject of the research is the method of constructing models using direct and inverse Laplace transforms, decomposition of the model into linear and nonlinear components, decomposition of the linear part of the model into input and output components. The purpose of this research is to develop a method that provides the construction of both discrete and continuous models of dynamic nonlinear objects for solving problems of structural and parametric identification of parameters by the method of regression analysis of time series based on the results of recording the values of input and output signals with a given time interval. *Materials and methods.* Developing a method for identifying structures and parameters of dynamic objects' models, the main provisions of the theory of systems, direct and inverse Laplace transforms, the theory of constructing discrete models, regression and system analysis of time series were used. *Results.* A method for identifying structures, parameters of discrete and continuous models of objects using regression analysis has been developed. When identifying models, the method provides a search for the number and values of poles, zeros of the transfer function, non-linearity coefficients of the object according to the criterion of the minimum standard deviation of the calculated values from the recorded values of the output signal. *Conclusions.* The method provides identification of the structure and parameters of discrete and continuous models by the criterion of the minimum standard deviation of the recorded and calculated values of the output signal. The application of the method of constructing and transforming models is possible in combination with various methods of integrating time series.

Keywords: nonlinear dynamic object, parametric identification, least squares regression analysis, discrete and continuous object models

For citation: Makarychev P.P., Shibanov S.V., Afonin A.Yu. Statement and solution of the identification problem of regression analysis method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):3–19. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-1

Введение

Задача параметрической идентификации моделей динамических объектов может быть решена с использованием одного из трех подходов [1–3]. Первый подход предполагает анализ амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик объекта. Второй подход предполагает анализ реакции объекта на импульсное или ступенчатое входное воздействие. Третий подход реализуется на основе регрессионного анализа входных и выходных сигналов, наблюдаемых в режиме рабочего функционирования объекта. Этот подход, как правило, применяется в ситуациях, когда эксперименты с динамическим объектом недопустимы или результаты идентификации в режиме реального времени используются для коррекции поведения динамического объекта.

В работе обсуждается вариант развития третьего подхода к решению задачи параметрической идентификации параметров непрерывной модели на основе декомпозиции на подзадачи. Предлагается идентификацию параметров непрерывной модели линейного объекта осуществлять в следующей последовательности:

1. Оценка значений параметров дискретной (разностной) модели по результатам регрессионного анализа наблюдаемых значений входного и выходного сигналов объекта на заданном интервале времени:

$$y_{k+n} = \sum_{j=1}^n a_{n-j} y_{k+(n-j)} + \sum_{i=1}^m b_{k-j} x_{k+(m-i)}, \quad n > m, \quad (1)$$

где y_{k+n} , $y_{k+(n-j)}$ – наблюдаемые значения выходного сигнала объекта; $x_{k+(m-i)}$ – наблюдаемые значения сигнала на входе объекта; a_{n-j} , b_{k-j} – параметры дискретной модели объекта.

2. Декомпозиция дискретной модели (1) с известными параметрами на два последовательно соединенных компонента, представляющих дискретную модель входа и дискретную модель выхода объекта:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_k &= \sum_{i=1}^m b_{k-j} x_{k+(m-i)}, \\ \tilde{y}_{k+n} - \sum_{j=1}^n a_{n-j} \tilde{y}_{k+(n-j)} &= \tilde{u}_k. \end{aligned}$$

3. Формирование по виду дискретных моделей двух передаточных функций в изображении по Лапласу. Первая передаточная функция содержит только нули передаточной функции объекта:

$$X(s)/U(s) = \frac{K}{(s + \beta_1)(s + \beta_2) \dots (s + \beta_m)},$$

где $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ – корни характеристического уравнения (нули); K – коэффициент передачи.

Вторая передаточная функция содержит только полюса передаточной функции объекта:

$$Y(s)/U(s) = \frac{1}{(s + \alpha_1)(s + \alpha_2) \dots (s + \alpha_n)},$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ – корни характеристического уравнения (полюса).

4. Формирование на основе передаточных функций систем уравнений в изображении по Лапласу, выполнение обратного преобразования Лапласа и построение систем конечно-разностных уравнений для входного и выходного компонентов модели объекта.

5. Расчет значений полюсов и нулей непрерывной передаточной функции объекта по результатам сопоставления значения весовых коэффициентов регрессионной модели с аналитическими определениями весовых коэффициентов, найденными с применением преобразований по Лапласу.

Для оценки близости регрессионной модели физическому объекту в работе использована процедура валидации. В качестве критерия соответствия параметров модели параметрам объекта использовалось минимальное стандартное отклонение расчетных значений от наблюдаемых значений выходной переменной [4, 5]. Предполагается, что значение выходной переменной в каждый момент времени является взвешенной суммой значений выходной

переменной, задержанных на временные интервалы, кратные шагу выборки Δt и случайной переменной $\varepsilon(k\Delta t)$.

1. Постановка задачи параметрической идентификации

Предположим, что по результатам наблюдения за функционированием нелинейного динамического объекта зафиксированы значения входной $x_k = x(k\Delta t)$ и выходной $y_k = \hat{y}(k\Delta t) + \varepsilon(k\Delta t)$ переменных в дискретные моменты времени $k\Delta t$ на заданном интервале времени $[0, N\Delta t]$. Наблюдения проведены при наличии шума, характеризуемого на выходе объекта случайной переменной $\varepsilon(k\Delta t)$.

Графики наблюдаемых переменных $x_k, y_k + \varepsilon_k$ при шаге дискретизации $\Delta t = 0,25$ мс приведены на рис. 1.

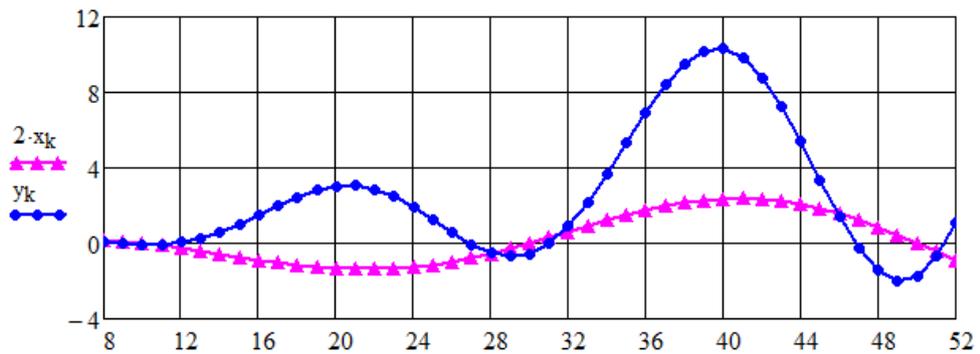


Рис. 1. Наблюдаемые переменные: x_k – входная независимая переменная; y_k – выходная зависимая переменная

На основе анализа значений и графиков переменных x_k, y_k практически невозможно определить структуру и параметры модели: количество полюсов и нулей передаточной функции, вид корней характеристического уравнения. В связи с этим целесообразно определить максимально допустимое количество полюсов n и нулей m . Для практической реализации параметрической идентификации можно принять $n_{\max} = 4, m_{\max} = 3$ и установить требование $n > m$. В этом случае потребуется на основе наблюдаемых значений входной и выходной переменных решить $n_{\max}(m_{\max} + 1)$ задач оценки параметров дискретной (непрерывной) модели и выбрать лучший вариант по заданному критерию.

В качестве объекта исследования выберем непрерывную модель, с использованием которой сформируем временные ряды выходного и входного сигналов: $y(k\Delta t), x(k\Delta t), \varepsilon(k\Delta t), k = 1, 2, \dots, N$. Структура имитационной модели в пространстве переменных состояния приведена на рис. 2, где приняты следующие обозначения: s – комплексная переменная преобразования Лапласа; α_1, α_2 – полюса объекта; K – коэффициент передачи; A_1, A_2 – весовые коэффициенты, значения которых зависят от нуля передаточной

функции линейной части динамического объекта. Параметры имитационной модели объекта имеют следующие значения:

$$A = 1,75; B = -0,75; K = 25; \alpha_1 = -5; \alpha_2 = -3.$$

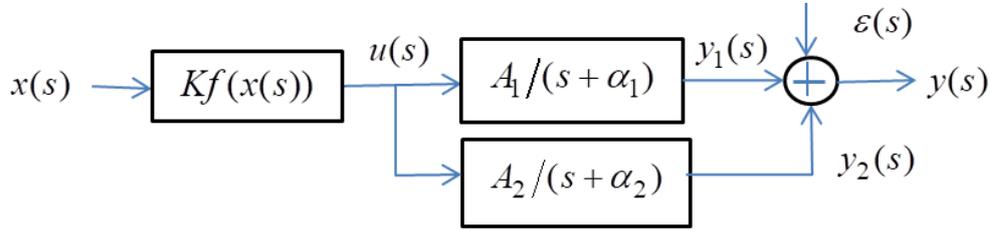


Рис. 2. Схема модели имитации нелинейного динамического объекта

В имитационной модели нелинейная часть объекта представлена многочленом второй степени:

$$u(x) = K \left(q_1 x(t) + q_2 (x(t))^2 \right), \quad q_1 = 0,2, \quad q_2 = 3,5.$$

Входной сигнал с широким спектром гармоник на входе нелинейной части динамического объекта имеет следующий вид:

$$x(t) = 3(1 - \exp(-at) \cos(2\pi t/T)), \quad T = 10, \quad a = 0,05.$$

Таким образом, в работе решение задачи параметрической идентификации нелинейного динамического объекта в зависимости от цели исследования сводится к определению параметров дискретной модели и непрерывной модели, адекватных имитационной модели с заданным набором нулей, полюсов и степени многочлена нелинейной части объекта.

2. Решение задачи параметрической идентификации

При решении задачи параметрической идентификации регрессионным методом наименьших квадратов нелинейные и динамические свойства объекта разделяют. При этом возможно использовать два варианта. Первый вариант предполагает последовательное соединение нелинейной статической части и линейной динамической части в модели, которая является классической нелинейной моделью Гаммерштейна [2, 3]. При втором варианте структура модели задается как последовательное соединение линейной динамической части и нелинейной части объекта. Эта модель является классической моделью Винера. Оба варианта обеспечивают построение моделей, в которых нелинейные и динамические свойства объекта искусственно разделены. Для построения более адекватных моделей осуществляют декомпозицию модели линейной динамической части объекта на менее сложные модели Гаммерштейна или Винера, посредством которых реализуется модель с параллельной структурой.

В данной работе для решения задачи параметрической идентификации нелинейного динамического объекта использована классическая нелинейная модель Гаммерштейна (рис. 3).

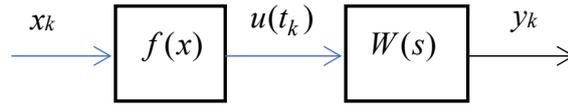


Рис. 3. Модель Гаммерштейна динамического объекта

В соответствии с этой моделью сигнал на входе линейной динамической части объекта в процессе эксперимента не наблюдается. В связи с этим задача идентификация параметров нелинейной части и линейной динамической части модели предполагает обоснование модели статической нелинейной части и динамической линейной части объекта.

3. Модель нелинейной части динамического объекта

При осуществлении параметрической идентификации могут быть использованы две группы нелинейных регрессионных моделей [6–10]. Первую группу составляют модели, нелинейные относительно входной (объясняющей) переменной, но линейные относительно оцениваемых параметров модели. Вторую группу составляют модели, нелинейные относительно оцениваемых параметров. Известны модели первой группы, реализованные с использованием функций: многочлен, гипербола. Из второй группы известны модели, реализованные с использованием функций: степенная, показательная, экспоненциальная.

При проведении исследований по теме статьи использована модель нелинейной части объекта из первой группы. При этом модель с одним входом и одним выходом представлена стандартно в виде многочлена от входной переменной $x_k = x(k\Delta t)$:

$$f = f(k\Delta t) = \sum_{j=0}^g q_j x^j(k\Delta t), \quad 2 \leq g \leq 3, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что минимальная степень многочлена $f(k, \Delta t)$ равна 2, максимальная степень многочлена равна 3. Использование многочлена с более высокой степенью не обеспечивает значимость оценки параметров модели нелинейного динамического объекта в целом. В связи с этим степень многочлена выбирается из множества целых чисел $Q_1 = \{2, 3\}$.

4. Обоснование непрерывной модели

Передаточная функция линейного динамического объекта (линейная часть объекта) может быть представлена в виде [1]:

$$W(s) = Y(s)/X(s) = K \prod_{i=1}^m T_i(s + \beta_i) / \prod_{j=1}^n T_j(s + \alpha_j), \quad 1 \leq n \leq 4, \quad (2)$$

где K – коэффициент передачи объекта; T_i , T_j – постоянные времени, характеризующие корни характеристического уравнения.

Декомпозиция передаточной функции (2) может быть осуществлена следующим образом:

$$Y(s) = \prod_{j=1}^n \alpha_j U(s) / \prod_{j=1}^n (s + \alpha_j), \quad (3)$$

$$U(s) = K \prod_{i=1}^m (s + \beta_i) x(s) / \prod_{i=1}^m \beta_i, \quad (4)$$

$$X(s) = \prod_{i=1}^m \beta_i U(s) / K \prod_{i=1}^m (s + \beta_i). \quad (5)$$

На основе выражений (3), (4) несложно построить системы уравнений в изображении по Лапласу для входной и выходной компонент модели объекта в изображении по Лапласу.

Задача параметрической идентификации решается при условии, что линейная динамическая часть объекта является минимальной фазовой, т.е. все полюса и нули имеют отрицательные или равные нулю значения вещественной части. Максимальное количество полюсов в передаточной функции объекта выбирается из множества целых чисел $Q_2 = \{1, 2, 3, 4\}$. Это ограничение на количество полюсов в передаточной функции введено из-за отсутствия алгоритмов аналитического решения алгебраических уравнений пятого и более высокого порядка. Максимальное количество нулей передаточной функции выбирается из множества $Q_3 = \{0, 1, 2, 3\}$. Таким образом, поиск оптимального (субоптимального) варианта параметрической идентификации параметров дискретной модели нелинейного динамического объекта выполняется на множестве допустимых решений, которое определяется как прямое произведение множеств Q_1, Q_2, Q_3 :

$$Q_r = Q_1 \times Q_2 \times Q_3.$$

Для линейной динамической части объекта также должно выполняться требование $m < n$. Сформулированные выше ограничения на линейную динамическую часть объекта можно рассматривать как трехместный предикат $P(g, n, m)$, множество истинности которого имеет вид

$$M_{n,m} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

В матрице $M_{n,m}$ номер строки соответствует количеству полюсов объекта, а номер столбца – количеству нулей передаточной функции линейной части объекта. Таким образом, из ограничений, введенных в (1)–(3), следует, что количество вариантов решения по выбору дискретной и непрерывной моделей нелинейного динамического объекта при заданной степени многочлена нелинейной части объекта равно 10. При изменении степени многочлена от 2 до 4 общее количество возможных дискретных моделей нелинейного динамического объекта возрастет до 30. Поиск оптимального варианта параметрической идентификации можно осуществить путем полного перебора всех рассмотренных выше вариантов моделей. Для поиска оптимального варианта в качестве целевой функции может быть использована функция среднего квадратичного отклонения [11]:

$$\sigma(g, n, m) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (y_k - \tilde{y}_k(g, n, m))^2},$$

где N – количество наблюдаемых значений выходного сигнала объекта.

5. Построение дискретной динамической модели

Дискретная модель объекта в изображении по Лапласу может быть построена на основе выражений (3), (4). Из (3) следует:

$$\begin{aligned} Y_{k+1}^1(s) &= Y_k^1 / (s + \alpha_1) + \prod_{j=1}^n \alpha_j U_k / (s + \alpha_1)s, \\ Y_{k+1}^2(s) &= Y_k^2 / (s + \alpha_2) + Y_k^1 / (s + \alpha_2)s, \\ &\dots\dots\dots \\ Y_{k+1}^n(s) &= Y_k^n / (s + \alpha_n) + Y_k^{n-1} / (s + \alpha_n)s, \end{aligned} \tag{6}$$

где $Y_k^1, Y_k^2, \dots, Y_k^n$ – начальные значения выходных сигналов.

На основе выражений (4), (5) вторая дискретная модель имеет вид

$$\begin{aligned} X_{k+1}^1(s) &= X_k^1 / (s + \beta_1) + (\prod_{i=1}^m \beta_i / K) U_k / (s + \beta_1)s, \\ &\dots\dots\dots \\ X_{k+1}^m(s) &= X_k^m / (s + \beta_m) + X_k^{m-1} / (s + \beta_m)s, \end{aligned} \tag{7}$$

где X_k^1, \dots, X_k^{m-1} – начальные значения входных сигналов.

Выполнив обратное преобразование Лапласа для уравнений (6), (7), получим систему конечно-разностных уравнений:

$$\begin{aligned} Y_{k+1}^1 &= Y_k^1 \exp(-\alpha_1 \Delta t) + U_k (1 - \exp(-\alpha_1 \Delta t)) / \alpha_1, \\ Y_{k+1}^2 &= Y_k^2 \exp(-\alpha_2 \Delta t) + Y_k^1 (1 - \exp(-\alpha_2 \Delta t)) / \alpha_2, \\ &\dots\dots\dots \\ Y_{k+1}^n &= Y_k^n \exp(-\alpha_n \Delta t) + Y_k^{n-1} (1 - \exp(-\alpha_n \Delta t)) / \alpha_n, \\ X_{k+1}^1 &= X_k^1 \exp(-\beta_1 \Delta t) + \prod_{i=1}^m \beta_i U_k (1 - \exp(-\beta_1 \Delta t)) / K \beta_1, \\ &\dots\dots\dots \\ X_{k+1}^m &= X_k^m \exp(-\beta_m \Delta t) + X_k^{m-1} (1 - \exp(-\beta_m \Delta t)) / \beta_m. \end{aligned} \tag{8}$$

6. Построение модели исследуемого объекта

Для объекта, схема модели которого приведена на рис. 2, система конечно-разностных уравнений, содержащая значения выходной переменной, имеет вид

$$U_k^1 = \alpha_1 \left[Y_{k+1}^1 - Y_k^1 \exp(-\alpha_1 \Delta t) \right] / (1 - \exp(-\alpha_1 \Delta t)),$$

$$Y_k^1 = \alpha_2 \left[Y_{k+1}^2 - Y_k^2 \exp(-\alpha_2 \Delta t) \right] / (1 - \exp(-\alpha_2 \Delta t)).$$

Конечно-разностное уравнение, содержащее значения входной переменной, имеет вид

$$U_k^2 = (K / \prod_{i=1}^m \beta_i) \left[X_{k+1}^1 - X_k^1 \exp(-\beta_1 \Delta t) \right] / (1 - \exp(-\beta_1 \Delta t)).$$

Приняв $n = 2$, $m = 1$, получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} U_k^1 &= \{ \alpha_1 \alpha_2 / [1 - \exp(-\alpha_1 \Delta t)] [1 - \exp(-\alpha_2 \Delta t)] \} \times \\ &\times \{ Y_{k+2} - Y_{k+1} [\exp(-\alpha_1 \Delta t) + \exp(-\alpha_2 \Delta t)] + Y_k \exp(-\alpha_1 \Delta t) \exp(-\alpha_2 \Delta t) \}, \\ U_k^2 &= \{ K / (\beta_1 [1 - \exp(-\beta_1 \Delta t)]) \} \times [X_{k+1} - X_k \exp(-\beta_1 \Delta t)]. \end{aligned}$$

Приняв $U_k^1 = U_k^2$, получим дискретную модель динамического объекта:

$$\begin{aligned} Y_{k+2} &= Y_{k+1} [\exp(-\alpha_1 \Delta t) + \exp(-\alpha_2 \Delta t)] - Y_k \exp(-\alpha_1 \Delta t) \exp(-\alpha_2 \Delta t) + \\ &+ \{ K [1 - \exp(-\alpha_1 \Delta t)] [1 - \exp(-\alpha_2 \Delta t)] / \beta_1 [1 - \exp(-\beta_1 \Delta t)] \} \times \\ &\times [X_{k+1} - X_k \exp(-\beta_1 \Delta t)]. \end{aligned} \quad (9)$$

7. Параметрическая идентификация модели

Рассмотрим решение задачи на примере параметрической идентификации минимально-фазового объекта, передаточная функция которого содержит только отрицательные полюса и нули. Размерность непрерывной модели объекта определяется следующими значениями: $n = 2$, $m = 1$, g_i , $i = 1, 2$. При этом передаточная функция линейной части объекта в изображении по Лапласу имеет вид

$$W(s) = K \left[(s + \beta_1) / \sum_{j=1}^2 (s + \alpha_j) \right].$$

На основе выражений (1), (9) в предположении $q_0 = 0$ дискретная модель нелинейного динамического объекта может быть представлена в виде конечно-разностного уравнения:

$$\tilde{y}_k = a_1 \tilde{y}_{k-1} + a_2 \tilde{y}_{k-2} + b_0 x_k + b_1 x_{k-1} + b_2 x_k^2 + b_3 x_{k-1}^2. \quad (10)$$

С использованием экспериментальных данных и выбранной структуры регрессионной модели (4) формируются матрицы \mathbf{Y} , \mathbf{W} для решения задачи параметрической идентификации методом наименьших квадратов [1, 2]. Матрица-столбец \mathbf{Y} содержит значения выходной переменной y_k , зарегистрированные в моменты времени $k \Delta t$, $k = 3, 4, \dots, 56$ (рис. 4).

	1		1		1
40	1.180408	40	10.30251	40	$1.529511 \cdot 10^{-5}$
41	1.1882	41	9.829023	41	$5.661323 \cdot 10^{-7}$
42	1.165362	42	8.78654	42	$-3.82237 \cdot 10^{-5}$
43	1.111423	43	7.259859	43	$-2.045724 \cdot 10^{-5}$
44	1.026764	44	5.39126	44	$-3.369206 \cdot 10^{-5}$
45	0.912628	45	3.369039	45	$-6.608229 \cdot 10^{-6}$
46	0.771107	46	1.409689	46	$5.090557 \cdot 10^{-5}$
47	0.605104	47	-0.263861	47	$9.026378 \cdot 10^{-6}$
48	0.418275	48	-1.445529	48	$2.566592 \cdot 10^{-5}$
49	0.214944	49	-1.969735	49	$3.698815 \cdot 10^{-5}$
50	0	50	-1.731185	50	$-8.145814 \cdot 10^{-7}$
51	-0.221224	51	-0.699302	51	$1.394005 \cdot 10^{-5}$
52	-0.443088	52	1.07424	52	$8.107966 \cdot 10^{-6}$
53	...	53	...	53	...

Рис. 4. Фрагменты временных рядов сигналов $x(k\Delta t)$, $y(k\Delta t)$, $\varepsilon(k\Delta t)$

На основе выражений (4), (5) формируется матрица W , содержащая 6 столбцов и 52 строки. Фрагмент матрицы W , содержащий 12 строк, в формате математического пакета Mathcad приведен на рис. 5.

	1	2	3	4	5	6
40	10.185058	9.51558	1.180408	1.143269	1.393363	1.307065
41	10.30251	10.185058	1.1882	1.180408	1.41182	1.393363
42	9.829023	10.30251	1.165362	1.1882	1.358068	1.41182
43	8.78654	9.829023	1.111423	1.165362	1.235261	1.358068
44	7.259859	8.78654	1.026764	1.111423	1.054245	1.235261
45	5.39126	7.259859	0.912628	1.026764	0.832891	1.054245
46	3.369039	5.39126	0.771107	0.912628	0.594606	0.832891
47	1.409689	3.369039	0.605104	0.771107	0.366151	0.594606
48	-0.263861	1.409689	0.418275	0.605104	0.174954	0.366151
49	-1.445529	-0.263861	0.214944	0.418275	0.046201	0.174954
50	-1.969735	-1.445529	0	0.214944	0	0.046201
51	-1.731185	-1.969735	-0.221224	0	0.04894	0
52	-0.699302	-1.731185	-0.443088	-0.221224	0.196327	...

Рис. 5. Фрагмент матрицы W в формате пакета Mathcad

В первом и во втором столбцах размещены значения выходной переменной y_{k-1} , y_{k-2} в моменты времени $(k-1)\Delta t$ и $(k-2)\Delta t$ соответственно. В третьем и четвертом столбцах размещены значения входной переменной x_k , x_{k-1} в моменты времени $k\Delta t$ и $(k-1)\Delta t$ соответственно. В пятом и шестом столбцах – значения входной переменной $(x_k)^2$ в моменты времени $k\Delta t$ и $(k-1)\Delta t$ соответственно. Количество строк в матрицах Y , W для рассматриваемого примера равно 45. Между сформированными матрицами Y , W существует функциональная зависимость:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{B}, \quad (11)$$

где \mathbf{B} – вектор параметров регрессионной модели $a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, b_3$.

Значения элементов вектора \mathbf{B} определяются регрессионным методом наименьших квадратов. Решение векторно-матричного уравнения (6) имеет вид [3, 4]:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{W}^T \cdot \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{Y}, \quad (12)$$

Результатом решения векторно-матричного уравнения (5) являются значения параметров регрессионной модели. Между параметрами регрессионной модели и дискретной модели (4) существует взаимно однозначное соответствие:

$$B = (B_1 = a_1 \quad B_2 = a_2 \quad B_3 = b_0 \quad B_4 = b_1 \quad B_5 = b_2 \quad B_6 = b_3).$$

8. Валидация дискретной модели динамического объекта

Оценка соответствия дискретной (разностной) модели реальному нелинейному динамическому объекту является задачей валидации. Оценка соответствия дискретной модели реальному объекту (имитационной модели) обеспечивает установление степени соответствия физических законов функционирования объекта, отраженных исследователем в дискретной модели или соответствие модели постановке решаемой задачи по применению объекта в системе управления.

Степень соответствия регрессионной модели исследуемому нелинейному динамическому объекту оценивалась величиной среднеквадратического отклонения, рассчитанных значений выходной переменной \tilde{y}_k от наблюдаемых значений y_k :

$$\sigma(g, n, m) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (y_k - \tilde{y}_k(g, n, m))^2}.$$

Значения выходной переменной регрессионной модели рассчитывались с использованием следующей формулы:

$$z_k = a_1 z_{k-1} + a_2 z_{k-2} + b_0 x_k + b_1 x_{k-1} + b_2 x_k^2 + b_3 x_{k-1}^2, \quad k = 8, 9, \dots, 52.$$

Начальные значения выходной рассчитываемой переменной z_{k-1}, z_{k-2} принимались из условия равенства наблюдаемым значениям выходной переменной:

$$z_{k-1} = y_{k-1}, \quad z_{k-2} = y_{k-2}.$$

Графики переменных y_k, \tilde{y}_{k-1} приведены на рис. 6. Среднее квадратичное отклонение рассчитанных значений z_k от «наблюдаемых» значений y_k составляет $\sigma = 0,958 \cdot 10^{-2}$.

График рассчитанных значений выходного сигнала z_k на рис. 6 для большей наглядности смещен на величину Δt относительно графика наблюдаемых значений выходного сигнала y_k .

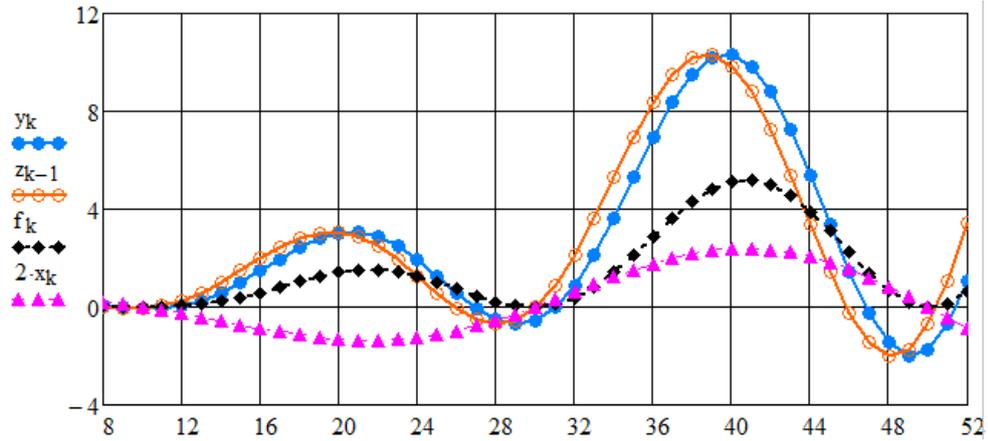


Рис. 6. Графики наблюдаемых значений y_k и рассчитанных значений \tilde{y}_k выходной переменной объекта

9. Непрерывная модель динамического объекта

Построение непрерывной модели объекта в работе осуществлялось следующим образом. В предположении, что корни передаточной функции вещественные и отрицательные, выполняется обратное преобразование Лапласа. При значениях $n = 2, m = 1$ система дискретных (разностных) уравнений в изображении по Лапласу имеет вид

$$y_k^1(s) = \frac{y_{k-1}^1}{(s + \alpha_1)} + \frac{Ku_k}{(s + \alpha_1)s}; \quad (13)$$

$$y_k^2(s) = \frac{y_{k-1}^2}{(s + \alpha_2)} + \frac{y_{k-1}^1}{(s + \alpha_2)s}; \quad (14)$$

$$x_k(s) = \frac{x_{k-1}}{(s + \beta)} + \frac{u_k}{(s + \beta)s}. \quad (15)$$

Первые слагаемые $y_{k-1}^1/(s + \alpha_1), y_{k-1}^2/(s + \alpha_2), x_{k-1}/(s + \beta)$ в правой части выражений (13)–(15) соответствуют общему решению дифференциальных уравнений. Вторые слагаемые выражений (13)–(15) соответствуют частным решениям дифференциальных уравнений первого порядка. Выполнив обратное преобразование Лапласа системы уравнений (13)–(15) при выбранном шаге дискретизации Δt , получим систему уравнений, определяющих дискретную модель объекта:

$$y_k^1 = y_{k-1}^1 \exp(\alpha_1 \Delta t) + (\exp(\alpha_1 \Delta t) - 1)Ku_k / \alpha_1; \quad (16)$$

$$y_k^2 = y_{k-1}^2 \exp(\alpha_2 \Delta t) + y_{k-1}^1 (\exp(\alpha_2 \Delta t) - 1) / \alpha_2; \quad (17)$$

$$x_k = x_{k-1} \exp(\beta \Delta t) + (\exp(\beta \Delta t) - 1)u_k / \beta, \quad (18)$$

где $y_{k-1}^1, y_{k-1}^2, x_{k-1}$ – начальные значения зависимых функций в уравнениях (16)–(18); u_k – начальное значение независимой переменной в уравнениях (16), (18); y_{k-1}^1 – начальные значения независимой функции в уравнении (17).

На основе соотношений (16)–(18) дискретную модель нелинейного динамического объекта можно представить в виде уравнения:

$$y_k = (c_1 + c_2)y_{k-1} - c_1c_2y_{k-2} + b_1b_2d_1q_1x_k - b_1b_2d_0q_1x_{k-1} + b_1b_2d_1q_2(x_k)^2 - b_1b_2d_0q_2(x_{k-1})^2, \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= \exp(\alpha_1\Delta t); \quad c_2 = \exp(\alpha_2\Delta t); \\ b_1 &= (\exp(-\alpha_1\Delta t) - 1)/\alpha_1; \quad b_2 = (\exp(-\alpha_2\Delta t) - 1)/\alpha_2; \\ d_0 &= \beta \exp(-\beta_1\Delta t) / (\exp(-\beta_1\Delta t) - 1); \quad d_1 = \beta / (\exp(-\beta_1\Delta t) - 1). \end{aligned} \quad (20)$$

В результате решения системы уравнений (20) могут быть определены численные значения всех параметров непрерывной модели нелинейного динамического объекта. Установление соответствия между непрерывной и дискретной моделями может быть выполнено с использованием процедуры верификации [10, 11], содержащей два этапа. На первом этапе определяются параметры модели линейной динамической части объекта, на втором – модели нелинейной части объекта.

10. Определение параметров модели объекта

Решение системы уравнений (15) выполняется в следующей последовательности.

Этап 1. Для расчета значений полюсов передаточной функции на основе выражений (7) составляется квадратное уравнение:

$$c^2 - B_1c - B_2 = 0. \quad (21)$$

В результате решения квадратного уравнения (21) определяются составляющие параметров непрерывной модели:

$$\begin{aligned} c_1 &= (B_1 - \sqrt{(B_1)^2 + 4B_2})/2 = 0,287, \\ c_2 &= (B_1 + \sqrt{(B_1)^2 + 4B_2})/2 = 0,472. \end{aligned}$$

С использованием значений c_1, c_2 вычисляются значения полюсов линейной динамической части объекта:

$$\alpha_1 = \ln(c_1)/\Delta t = -4,999, \quad \alpha_2 = \ln(c_2)/\Delta t = -3,000. \quad (22)$$

Из (22) следует, что погрешность идентификации полюсов непрерывной модели при среднем квадратичном отклонении $\sigma = 0,958 \cdot 10^{-2}$ практически равна нулю. При значении $\sigma = 0,118 \cdot 10^{-1}$ погрешность идентификации

составляет 13 %, $\sigma = 0,407 \cdot 10^{-1}$. При этом полюса модели идентифицируются как комплексные.

Этап 2. Рассчитываются коэффициенты b_1, b_2 по формулам:

$$b_1 = (c_1 - 1)/\alpha_1 = 0,143, \quad b_2 = (c_2 - 1)/\alpha_2 = 0,176.$$

Значение для нуля в передаточной функции в числителе линейной части модели рассчитывается по формуле

$$\beta = \ln(-B_3/B_4)/\Delta t = -1,041. \quad (23)$$

В соответствие с (23) погрешность идентификации нуля непрерывной модели динамического объекта не более 4 %.

Этап 3. Вычисляются весовые коэффициенты модели, которые определяются значением нуля передаточной функции:

$$d_0 = c_3\beta/(c_3 - 1) = -3,502, \quad d_1 = \beta/(c_3 - 1) = -4,543,$$

где $c_3 = \exp(-\beta\Delta t) = 0,771$.

Этап 4. Параметры нелинейной статической части модели объекта определяются следующим образом:

$$q_1 = (B_3 + B_4)/b_1b_2(d_1 - d_0)K = -0,192,$$

$$q_2 = (B_5 + B_6)/b_1b_2(d_1 - d_0)K = -3,361.$$

Контроль соответствия параметров непрерывной модели параметрам дискретной модели выполняется путем проверки выполнения двух равенств:

$$(B_1 + B_2)/(\exp(-\alpha_1\Delta t) + \exp(-\alpha_2\Delta t) - \exp(-\alpha_1\Delta t)\exp(-\alpha_2\Delta t)) = 1; \quad (24)$$

$$(B_3 + B_4 + B_5 + B_6)/b_1b_2(d_1q_1 - d_0q_1 + d_1q_2 - d_0q_2) = K. \quad (25)$$

Если равенства (24), (25) выполняются, то производится оценка отклонения значений выходной переменной непрерывной модели от значений выходной переменной дискретной модели. Построение и верификация непрерывной модели могут быть востребованы при необходимости иметь для проведения исследований непрерывную модель объекта или дискретную модель с отличающимся шагом дискретизации Δt .

Заключение

Проведенные исследования с имитационными моделями позволяют утверждать, что идентификация нелинейных динамических объектов может выполняться в следующей последовательности:

1. Выбор структуры динамического нелинейного объекта и задание количества полюсов и нулей передаточной функции объекта.
2. Обоснование варианта модели нелинейного динамического объекта в виде модели Гаммерштейна.
3. Формирование разностного уравнения исследуемого нелинейного динамического объекта на основе предположения о составе полюсов и нулей передаточной функции.

4. Решение задачи идентификации регрессионным методом наименьших квадратов и определение параметров дискретной модели объекта.

5. Оценка погрешности идентификации по среднему квадратичному отклонению рассчитанных значений от наблюдаемых значений выходной переменной.

6. Расчет параметров непрерывной модели по результатам идентификации параметров дискретной модели нелинейного динамического объекта.

Параметры регрессионной модели определяются на основе имеющихся значений наблюдаемых входной и выходной переменных объекта, методом наименьших квадратов определяются параметры регрессионной модели. Параметры дискретной и непрерывной моделей определяются с использованием обратного преобразования Лапласа. Оценка параметров модели нелинейного динамического объекта должна быть реализована на основе согласования структур регрессионной модели и дискретной модели объекта. Количество нулей, полюсов, весовых коэффициентов нелинейной части объекта определяется из условия минимума среднеквадратичного отклонения рассчитанных значений от наблюдаемых значений выходной переменной.

Для решения подзадач параметрической идентификации, отмеченных выше, использована информационно-аналитическая система Loginom Community 6.4. Данная система поддерживает процессы подготовки данных, регрессионного анализа, моделирования, расчета параметров непрерывной модели на основе параметров дискретной модели объекта и визуализации. В системе можно решать задачи параметрической линейной и логистической регрессии при конечном числе неизвестных параметров. Визуализатор системы Loginom обеспечивает отображение информации о входных данных, регрессионной модели, коэффициентах регрессии и детерминации, степени статистической связи между входными и выходными переменными регрессионной модели (Loginom company. URL: <https://loginom.ru>).

Список литературы

1. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. Introduction to Linear Regression Analysis, 5th Edition. John Wiley & Sons, 2012. 672 p.
2. Kumaran @ Kumar J., Ravi G. A Simple Regression Model for Electrical Energy Forecasting // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2014. Vol. 3, iss. 8. P.11331–11335.
3. Епанешников В. Д., Епанешников И. В. Модели параметрической идентификации нелинейных систем автоматического регулирования // Детерминированные системы. 2012. № 2 (32). С. 112–120.
4. Montgomery D. C., Peck E. A. Introduction to Linear Regression Analysis. New York : Jons Wiley & Sons, 1982. 504 p.
5. Макарычев П. П. Построение модели системной динамики по результатам регрессионного анализа // Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2017. С. 113–117.
6. Макарычев П. П., Афонин А. Ю., Шибанов С. В. Прогнозирование состояния объекта на основе авторегрессионной модели // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 2. С. 11–12.
7. Вятченников Д. Н., Кособуцкий В. В., Носенко А. А., Плотников Н. В. Идентификация нелинейных динамических объектов во временной области // Вестник южно-уральского государственного университета. 2006. № 14. С. 66–70.

8. Макарычев П. П., Волгина М. А. Моделирование многокомпонентных систем на основе маркированных графов : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. 156 с.
9. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ : пер. с англ. 3-е изд. М. : Изд. дом «Вильямс», 2007.
10. Mikles J., Fikar M. *Process Modelling, Identification, and Control*. Springer, 2007. 497 p.
11. Кацюба О. А., Карпов А. А., Тимонин Д. В. Параметрическая идентификация нелинейных динамических систем класса Гаммерштейна при наличии помех, наблюдаемых в выходных сигналах в условиях априорной неопределенности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2011. № 2. С. 92–103.

References

1. Montgomery D.C., Peck E.A., Vining G.G. *Introduction to Linear Regression Analysis, 5th Edition*. John Wiley & Sons, 2012:672.
2. Kumaran @ Kumar J., Ravi G. A Simple Regression Model for Electrical Energy Forecasting. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2014;3(8):11331–11335.
3. Epaneshnikov V.D., Epaneshnikov I.V. Models of parametric identification of nonlinear automatic control systems. *Determinirovannye si-stemy = Deterministic systems*. 2012;2(32):112–120. (In Russ.)
4. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introdaction to Linear Regression Analysis*. New York: Jons Wiley & Sons, 1982:504.
5. Makarychev P.P. Building a model of system dynamics based on the results of regression analysis. *Analiticheskie i chislennye metody modelirovaniya estestvenno-nauchnykh i sotsial'nykh problem: materialy XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Analytical and numerical methods for modeling natural science and social problems: proceedings of the 12th International scientific and engineering conference*. Penza, 2017:113–117. (In Russ.)
6. Makarychev P.P., Afonin A.Yu., Shibanov S.V. Predicting the state of an object based on an autoregressive model. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavede-niy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2019;(2):11–12. (In Russ.)
7. Vyatchennikov D.N., Kosobutskiy V.V., Nosenko A.A, Plotnikov N.V. Identification of nonlinear dynamic objects in the time domain. *Vestnik yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University*. 2006;(14):66–70. (In Russ.)
8. Makarychev P.P., Volgina M.A. *Modelirovanie mnogokomponentnykh sistem na osnove markirovannykh grafov: monografiya = Modeling of multicomponent systems based on labeled graphs: monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2011:156. (In Russ.)
9. Dreyper N., Smit G.. *Prikladnoy regressiionnyy analiz: per. s angl. 3-e izd. = Applied regression analysis: translated from English. The 3rd edition*. Moscow: Izd. dom «Vil'yams», 2007. (In Russ.)
10. Mikles J., Fikar M. *Process Modelling, Identification, and Control*. Springer, 2007:497.
11. Katsyuba O.A., Karpov A.A., Timonin D.V. Parametric identification of nonlinear dynamic systems of the Hammerstein class in the presence of noise observed in the output signals under conditions of a priori uncertainty. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2011;(2):92–103. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Петр Петрович Макарычев

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой математического
обеспечения и применения ЭВМ,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: pm@pnzgu.ru

Petr P. Makarychev

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of mathematical
support and application of computers,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Сергей Владимирович Шибанов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры математического
обеспечения и применения ЭВМ,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: pm@pnzgu.ru

Sergey V. Shibanov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of mathematical
support and application of computers,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Афонин

кандидат технических наук, доцент
кафедры математического
обеспечения и применения ЭВМ,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: pm@pnzgu.ru

Aleksandr Yu. Afonin

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of mathematical support and application
of computers, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 10.01.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 04.02.2022

Принята к публикации / Accepted 25.02.2022

УДК 519.876.2, 65.011.56
doi:10.21685/2072-3059-2022-1-2

Мощность энтропийно-параметрического критерия проверки статистических гипотез для систем управления и обработки информации

В. Г. Полосин

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
polosin-vitalij@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Применение энтропийно-параметрического критерия в качестве решающего правила предполагает возникновение ошибок второго рода, способных нанести существенный материальный ущерб в технических, медицинских, информационно-измерительных и управляющих системах. Для предотвращения ошибок второго рода необходимо априорно оценить способность энтропийно-параметрического критерия выявить незначительные эффекты и изменения состояния объекта. Цель работы состоит в оценке мощности энтропийно-параметрического критерия, учитывающего информационные и вероятностные свойства выборок результатов измерений. *Материалы и методы.* Теоретическую и методологическую основу исследований составил анализ энтропийно-параметрического критерия в пространстве центрированных относительно конкурирующей гипотезы оценок коэффициента энтропии и контрэкссесса, приведенных к их среднеквадратическим отклонениям. *Результаты.* В результате геометрической интерпретации взаимного расположения гипотез получены математические выражения для расчета вероятности появления ошибки второго рода и мощности энтропийно-параметрического критерия в зависимости от положения нулевой гипотезы в центрированном пространстве конкурирующей гипотезы. *Выводы.* Показано, что в анизотропном пространстве приведенных оценок энтропийного коэффициента и контрэкссесса, центрированного относительно альтернативной гипотезы, мощность энтропийного критерия зависит от направления положения нулевой гипотезы. Даны рекомендации по выбору вероятности совершения ошибки второго рода, ограничивающей область, в которой нулевая гипотеза признается неверной с вероятностью 80 %.

Ключевые слова: коэффициент энтропии, контрэкссесс, энтропийно-параметрический критерий, пространство приведенных центрированных оценок, нулевая и альтернативная гипотеза, статистическая мощность критерия

Для цитирования: Полосин В. Г. Мощности энтропийно-параметрического критерия проверки статистических гипотез для систем управления и обработки информации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 20–31. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-2

The power of the entropy-parametric criterion for testing statistical hypotheses in control systems and information processing

V.G. Polosin

Penza State University, Penza, Russia
polosin-vitalij@yandex.ru

Abstract. *Background.* The use of the entropy-parametric criterion as a decisive rule implies the occurrence of errors of the second kind, capable of causing substantial material damage in technical, medical, information-measuring and control systems. To prevent errors of the second kind, it is necessary to a priori assess the ability of the entropy-parametric criterion to detect minor effects and changes in the state of an object. The purpose of the work is to estimate the power of the entropy – parametric criterion, which takes into account the informational and probabilistic properties of the samples of measurement results. *Materials and methods.* The theoretical and methodological basis of the research is an analysis of the entropy-parametric criterion in space centered relative to the competing hypothesis of the estimates of the entropy coefficient and the counter-process, given to their standard deviations. *Results.* As a result of the geometric interpretation of the mutual arrangement of hypotheses, mathematical expressions are obtained for calculating the probability of an error of the second kind and the power of the entropy – parametric criterion depending on the position of the null hypothesis in the centered space of the competing hypothesis. *Conclusions.* It is shown that in the anisotropic spaces of the above estimates of the entropy coefficient and the counter-process centered on the alternative hypothesis, the power of the entropy criterion depends on the direction of the position of the null hypothesis. Recommendations are given on the choice of the probability of making a second kind of error, limiting the area in which the null hypothesis is considered invalid with a probability of 80 %.

Keywords: the coefficient of entropy, anti-kurtosis, entropy parametric criterion, space of reduced centered estimates, the null and alternative hypothesis, statistical power of the criterion

For citation: Polosin V.G. The power of the entropy-parametric criterion for testing statistical hypotheses in control systems and information processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):20–31. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-2

Введение

Благодаря развитию информационных технологий статистические методы системного анализа находят широкое распространение при исследовании сложных объектов. Результат системных исследований, как правило, направлен на выбор вполне определенной альтернативы при моделировании сигналов системы или принятии управленческих решений. Правомерность гипотетической модели статистического распределения для массива значений наблюдаемых параметров объекта устанавливается на основе сравнительного анализа результатов экспериментальных исследований и модели статистического распределения. Задача проверки гипотез связана с вычислением вероятности совершения ошибки первого и второго рода на основе оценки критериев по выборке результатов случайных значений, точное или приближенное распределение которых известно [1–3].

Задачи статистического моделирования при проведении физических и технических исследований связаны с анализом закономерностей распределений результатов измерений, содержащих наиболее полную информацию о характере и природе предмета наблюдения. Форма принятой гипотетической модели распределения результатов, с одной стороны, указывает на происхождение влияющих факторов и, следовательно, причины разброса результатов, с другой – отражает внутреннее строение самого объекта [4, 5].

Объединение параметрической и информационной неопределенностей при анализе статистических распределений позволило разработать энтропийно-параметрический критерий оценки правомерности распределений в про-

странстве энтропийного коэффициента и контрэксцесса для проверки моделей на основе вероятностных распределений [6]. Для формирования уровня значимости энтропийно-параметрического критерия справедливости гипотез использовано пространство приведенных центрированных оценок коэффициента энтропии и параметра контрэксцесса вблизи положения нулевой гипотезы H_0 [6, 7].

При установлении справедливости статистических моделей достаточно часто более существенны последствия ошибки второго рода, состоящей в принятии неверной нулевой гипотезы H_0 при справедливой конкурирующей гипотезе H_1 . Вероятность совершения ошибки второго рода β определена распределением конкурирующей гипотезы и положением области принятия нулевой гипотезы. В этих случаях приоритет принятия решения возлагается на статистическую мощность критерия $(1 - \beta)$, равную вероятности отклонения основной (нулевой) гипотезы в случае, когда верна конкурирующая альтернативная гипотеза [8–10]. Чем выше мощность статистического критерия, тем меньше вероятность совершить ошибку второго рода и выше надежность принятия правильного решения. Мощность критерия – это вероятность различения альтернативной гипотезы H_1 , если гипотеза верна, или вероятность правильного отклонения нулевой гипотезы H_0 [11]. Для оценки ошибки второго рода при использовании энтропийно-параметрического критерия необходимо определение мощности критерия, что определяет актуальность проводимого исследования.

Пространство приведенных центрированных оценок энтропийного коэффициента и параметра контрэксцесса конкурирующей гипотезы

Уравнение кривой, ограничивающей область принятия нулевой гипотезы с доверительной вероятностью $(1 - \alpha)$ в пространстве приведенных оценок ξ и η энтропийного коэффициента k_3 и параметра контрэксцесса κ , центрированных относительно нулевой гипотезы, имеет вид

$$\xi_\alpha^2 + \eta_\alpha^2 = r_\alpha^2 b^{-2}, \quad (1)$$

где ξ_α и η_α – переменные кривой в пространстве приведенных центрированных оценок ξ и η энтропийного коэффициента и контрэксцесса нулевой гипотезы:

$$\xi = \frac{k_3 - k_{30}}{S(k_3)}, \quad \eta = \frac{\kappa - \kappa_0}{S(\kappa)},$$

здесь k_{30} и κ_0 – коэффициенты энтропии и контрэксцесса для нулевой гипотезы H_0 ; $S(k_3)$ и $S(\kappa)$ – среднее квадратическое отклонение оценок коэффициента энтропии и контрэксцесса [12]:

$$S(k_3) = \frac{0,9}{\kappa k_3^2 \sqrt{k_3 n}}; \quad (2,a)$$

$$S(\kappa) = \kappa \frac{\sqrt[4]{(\varepsilon^2 - 1)^3}}{\sqrt{29 \cdot n}}. \quad (2,b)$$

Положение выборки результатов в пространстве приведенных центрированных оценок ξ' и η' конкурирующей гипотезы задано с помощью случайной величины модуля радиуса-вектора r' положения выборки результатов относительно положения альтернативной гипотезы:

$$r' = \sqrt{(\xi')^2 + (\eta')^2}. \quad (3)$$

Формулы для расчета приведенных оценок ξ' и η' , центрированных относительно положения конкурирующей гипотезы H_1 , имеют вид

$$\xi' = \frac{k_3 - k_{31}}{S(k_{31})}, \quad \eta' = \frac{\kappa - \kappa_1}{S(\kappa_1)}, \quad (4)$$

здесь $S(k_{31})$ и $S(\kappa_1)$ – средние квадратические погрешности коэффициента энтропии k_{31} и контрэксцесса κ_1 для конкурирующей гипотезы, рассчитанные в координатном пространстве оценок коэффициента энтропии k_3 и контрэксцесса κ , заданного соответственно выражениями (2,а) и (2,б).

Приведенные координаты ξ и η пространства, центрированного относительно нулевой гипотезы, и приведенные координатами ξ' и η' пространства, центрированного относительно конкурирующей гипотезы, связаны соотношениями вида

$$\xi = \frac{S(k_{31})}{S(k_{30})}(\xi' - \xi'_0), \quad \eta = \frac{S(\chi_{31})}{S(\chi_{30})}(\eta' - \eta'_0), \quad (5)$$

здесь $S(k_{30})$ и $S(\chi_{30})$ – средние квадратические погрешности энтропийного коэффициента k_{30} и контрэксцесса χ_{30} нулевой гипотезы соответственно; ξ'_0 и η'_0 – приведенные координаты положения нулевой гипотезы в пространстве, центрированном относительно положения альтернативной гипотезы, найденные с помощью выражений (4).

Геометрическая интерпретация относительного положения гипотез

В пространстве, центрированном относительно альтернативной гипотезы H_1 , область принятия нулевой гипотезы H_0 с вероятностью $(1 - \alpha)$ ограничена замкнутой кривой, заданной переменными ξ'_α и η'_α . Выразив из соотношений (5) переменные ξ_α и η_α кривой, ограничивающей область принятия решения в пространстве нулевой гипотезы, через переменные ξ'_α и η'_α той же кривой пространства альтернативной гипотезы, и подставив полученные соотношения в уравнение окружности (1), получим уравнение эллипса, ограничивающего область принятия нулевой гипотезы в пространстве координат ξ' и η' альтернативной гипотезы вида

$$\frac{(\xi'_\alpha - \xi'_0)^2}{A^2} + \frac{(\eta'_\alpha - \eta'_0)^2}{B^2} = r_\alpha^2, \quad (6)$$

где A и B – параметры эллипса, определяемые отношением средних квадратических отклонений (СКО) энтропийных коэффициентов и отношением СКО контрэксцессов нулевой гипотезы H_0 к альтернативной H_1 :

$$A = \frac{S(k_{\varepsilon 0})}{S(k_{\varepsilon 1})}, B = \frac{S(\kappa_0)}{S(\kappa_1)}.$$

Из полученного уравнения (6) следует, что оси эллипса параллельны координатным осям $O'\xi'$ и $O'\eta'$ пространства, центрированного относительно альтернативной гипотезы, причем значения полуосей эллипса $\Delta\xi'_\alpha$ и $\Delta\eta'_\alpha$ в пространстве координат ξ' и η' конкурирующей гипотезы пропорциональны критерию r_α :

$$\Delta\xi'_\alpha = A \cdot r_\alpha, \Delta\eta'_\alpha = B \cdot r_\alpha. \quad (7)$$

При малых относительных смещениях нулевой H_0 и альтернативной H_1 гипотез друг относительно друга ($r'_0 \ll 1$) СКО оценок приведенных оценок будут равны. В этом случае кривая, ограничивающая область принятия нулевой гипотезы в центрированном относительно альтернативной гипотезы пространстве оценок ξ' и η' , примет форму окружности, радиус которой будет равен энтропийному критерию r_α . По мере увеличения расстояния между нулевой и альтернативной гипотезами увеличивается разница между СКО оценок нулевой и конкурирующей гипотез, что обуславливает сжатие или растяжение всей области принятия решений в соответствии с выражением (7). Значения модуля радиус-вектора r'_0 и угла ϕ'_0 положения нулевой гипотезы в пространстве альтернативной гипотезы связаны с коэффициентами энтропий $k_{\varepsilon 0}$ и $k_{\varepsilon 1}$, контрэксцессами κ_0 и κ_1 нулевой и альтернативной гипотез с помощью выражений:

$$r'_0 = \sqrt{\left(\frac{k_{\varepsilon 0} - k_{\varepsilon 1}}{S(k_{\varepsilon 1})}\right)^2 + \left(\frac{\kappa_0 - \kappa_1}{S(\kappa_1)}\right)^2}, \phi'_0 = \arctg\left(A \cdot \frac{k_{\varepsilon 0} - k_{\varepsilon 1}}{\kappa_0 - \kappa_1}\right). \quad (8)$$

На рис.1,**a** дано положение нулевой гипотезы в пространстве альтернативной гипотезы. Область принятия альтернативной гипотезы в пространстве оценок ξ' и η' имеет форму круга, радиус которого равен критерию r_α уровня значимости α . Так как СКО контрэксцесса с увеличением его значения уменьшается быстрее, чем СКО коэффициента энтропии, то область принятия нулевой гипотезы в третьей четверти координатного пространства альтернативной гипотезы приобретает сжатие по оси ξ' .

Несмотря на то, что радиусы круговых областей принятия нулевой и альтернативной гипотез в центрированных относительно этих же гипотез координатных пространствах равны значению критерия r_α , в пространстве альтернативной гипотезы происходит деформация области принятия нулевой гипотезы с изменением ее площади, причем общая площадь эллиптической области принятия решения нулевой гипотезы в первой и четвертой четвертях пространства альтернативной гипотезы уменьшается (рис. 1,**б**) и увеличивается во второй и третьей четвертях того же пространства (рис. 1,**а**).

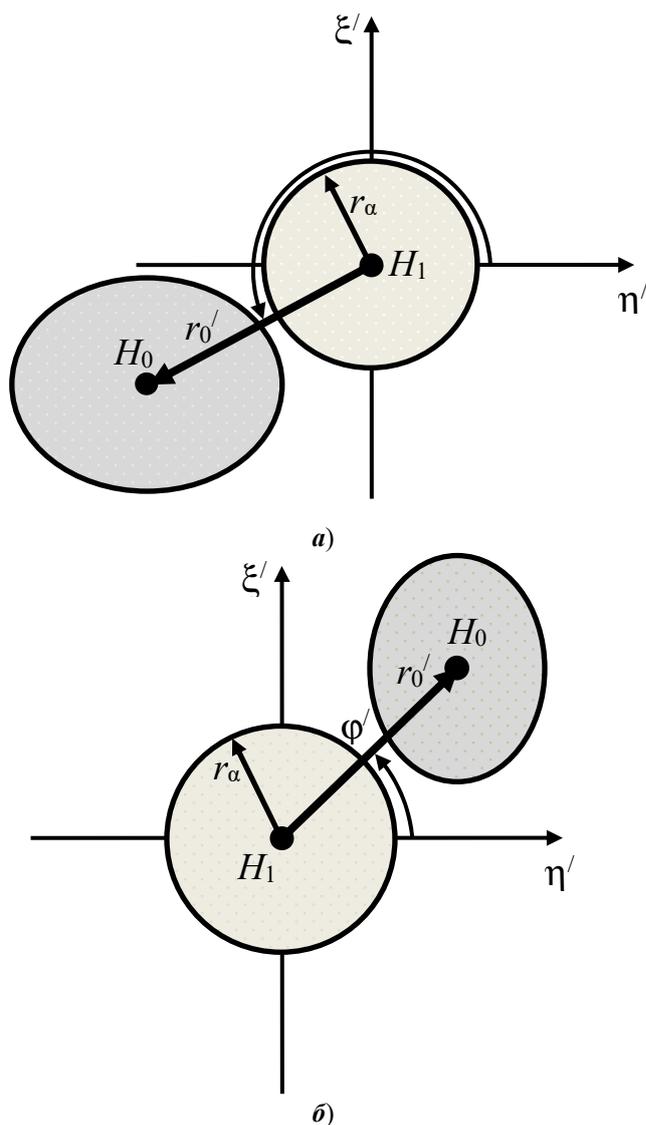


Рис. 1. Положение гипотез в пространстве конкурирующей гипотезы

Следует отметить еще одну особенность пространства альтернативной гипотезы, состоящую в том, что вероятность распределения расстояния r' от центра пространства, заданного положением альтернативной гипотезы, до положения выборки результатов, соответствующих альтернативной гипотезе, подобно распределению случайных величин r модуля расстояния от центра пространства нулевой гипотезы до положения выборки результатов, соответствующих нулевой гипотезе. В этой связи для случайной величины модуля расстояния r' в пространстве альтернативной гипотезы будет справедливо двухпараметрическое распределение Вейбулла – Гнеденко [6, 7]. Для приведенных центрированных оценок ξ' и η' выборок результатов, соответствующих альтернативной гипотезе, применим нормальный закон распределения.

Мощность энтропийно-параметрического критерия

При сравнении пространств следует отметить еще одну особенность этих пространств, состоящую в том, что распределение в пространстве координат ξ и η возможных положений выборок результатов, соответствующих нулевой гипотезе, и распределение в пространстве координат ξ' и η' выборок результатов, удовлетворяющих альтернативной гипотезе, имеют одинаковые закономерности. Проводя аналогию пространств, запишем вероятность $\Delta P(\xi', \eta')$ попадания гипотетической реализации, принадлежащей альтернативной гипотезе H_1 , в элементарную область площадью $(\Delta\xi' \cdot \Delta\eta')$ и координатами ξ' и η' :

$$\Delta P(\xi', \eta') = \frac{1}{2\pi} \cdot e^{-\frac{1}{2}((\xi')^2 + (\eta')^2)}. \quad (9)$$

Суммируя полученные вероятности по всей эллиптической области принятия решения о справедливости нулевой гипотезы, запишем интегральное выражение для определения вероятности возникновения ошибки второго рода β при использовании энтропийного критерия r_α :

$$\beta = \int_{-\Delta\eta'_\alpha}^{\Delta\eta'_\alpha} \int_{(\xi'_\alpha(\eta'_\alpha) - \xi'_0)}^{(\xi'_\alpha(\eta'_\alpha) - \xi'_0)} \frac{1}{2\pi} \cdot e^{-\frac{(\xi'_\alpha + \xi'_0)^2 + (\eta'_\alpha + \eta'_0)^2}{2}} d\xi' \cdot d\eta'. \quad (10)$$

Для вычисления вероятности возникновения ошибки второго рода при использовании энтропийно-параметрического критерия удобно использовать интегрирование относительно одной переменной:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\Delta\eta'_\alpha}^{\Delta\eta'_\alpha} e^{-\frac{(\eta'_\alpha + \eta'_0)^2}{2}} \cdot \left(\Phi_0 \left(\xi'_0 + A \cdot B^{-1} \cdot \left| \sqrt{B^2 r_\alpha^2 - (\eta'_\alpha)^2} \right| \right) - \Phi_0 \left(\xi'_0 - A \cdot B^{-1} \cdot \left| \sqrt{B^2 r_\alpha^2 - (\eta'_\alpha)^2} \right| \right) \right) d\eta'_\alpha, \quad (11)$$

здесь $\Phi_0(x)$ – функция Лапласа.

Координаты ξ'_0 и η'_0 положения нулевой гипотезы в пространстве альтернативной гипотезы удобно задавать в полярных координатах модуля радиус-вектора r'_0 и угла положения φ'_0 :

$$\begin{aligned} \xi'_0 &= r'_0 \cdot \sin(\varphi'_0), \\ \eta'_0 &= r'_0 \cdot \cos(\varphi'_0). \end{aligned} \quad (12)$$

Подстановка выражений (12), связывающих декартовы и полярные координаты положения нулевой гипотезы, в интегральное выражение (11) позволяет построить зависимости ошибки второго рода β от изменения расстоя-

ния r'_0 и угла ϕ'_0 положения нулевой гипотезы в пространстве альтернативной гипотезы. Графики зависимостей для вероятности β возникновения ошибки второго рода при использовании энтропийного критерия r_α от расстояния r'_0 между гипотезами, определяемого в пространстве альтернативной гипотезы, даны на рис. 2. Графики получены с помощью численного интегрирования выражения (11). В качестве нулевой гипотезы, используемой при расчете графиков на рис. 2, была принята гипотеза о распределении Лапласа с известными коэффициентом энтропии и контрэксцессом, равными 1,92 и 0,408 соответственно. Графики построены при фиксированных углах ϕ'_0 и четырех уровнях значимости: $\alpha_1 = 0,1 \%$, $\alpha_2 = 5 \%$, $\alpha_3 = 20 \%$ и $\alpha_4 = 50 \%$.

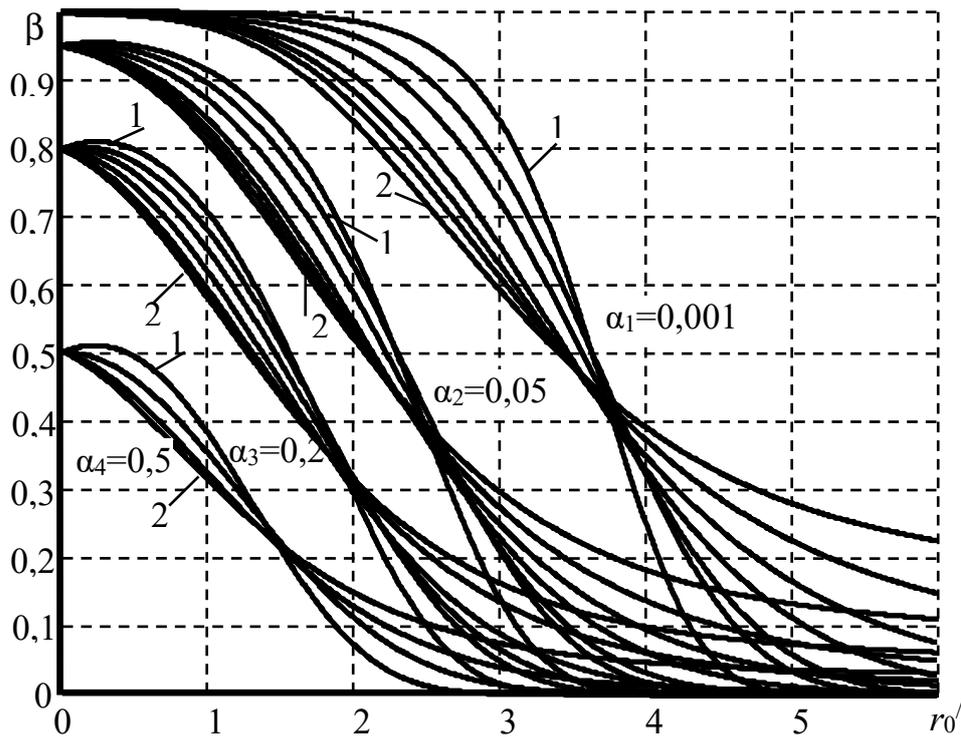


Рис. 2. Графики вероятности возникновения ошибки второго рода β от модуля расстояния между альтернативной и нулевой гипотезами при различных уровнях значимости α энтропийно-параметрического критерия

Все кривые, обозначенные на рис. 2 цифрой 1, рассчитаны для угла $\phi'_0 = 0$, что соответствует координатам положения нулевой гипотезы $\eta'_0 = 0$ и $\xi'_0 = r'_0 > 0$. Кривые, обозначенные цифрой 2, рассчитаны для угла $\phi'_0 = \pi$, что соответствует координатам $\eta'_0 = 0$ и $\xi'_0 = -r'_0 < 0$.

Из анализа графиков вероятности возникновения ошибки второго рода β от модуля расстояния между альтернативной и нулевой гипотезами (рис. 2) видим, что наиболее крутой спад вероятности β возникновения ошибки второго рода с увеличением расстояния r'_0 происходит при углах ϕ'_0 , равных

нулю. Это направление соответствует смещению альтернативной гипотезы в направлении контрэксцесса k , равного нулю. Наиболее пологий спад вероятности β происходит при углах ϕ'_0 , равных π . В этом случае контрэксцесс альтернативной конкурирующей гипотезы смещается в направлении увеличения относительно нулевой гипотезы. При совпадении координат нулевой и альтернативной гипотез вероятностность возникновения ошибки второго рода β равна вероятности совершения ошибки первого рода $(1 - \alpha)$, так как интегрирование проводится по одной и той же границе.

Вероятность ошибки второго рода β соответствует вероятности утверждения, что верна нулевая гипотеза H_0 при справедливой альтернативной гипотезе H_1 . Вероятность ошибки второго рода β рассчитывается при заданной вероятности α появления ошибки первого рода, которая состоит в отклонении нулевой гипотезы H_0 при ее справедливости.

На практике для выявления эффекта вместо вероятности ошибки второго рода применяется мощностью критерия, равная вероятности противоположного события $(1 - \beta)$, которое состоит в утверждении, что ложная нулевая гипотеза верно отвергнута. Мощность – одна из основных характеристик статистического критерия, которая связана с количеством выборки результатов, уровнем значимости критерия, вероятностью ошибки второго рода [11, 13]. При планировании исследований очень полезен априорный анализ мощности, так как позволяет сформировать меру «расстояния» между нулевой H_0 и альтернативной H_1 гипотезами, необходимую для обнаружения эффекта. Если эффект меньше ожидаемого, то необходима оценка фактической мощности наблюдаемого эффекта для того, чтобы признать результат адекватным. Если мощность ниже требуемого уровня, то результат статистически незначим.

Графики зависимостей мощности энтропийно-параметрического критерия от модуля расстояния между альтернативной и нулевой гипотезами при различных уровнях значимости α критерия даны на рис. 3, где указаны кривые 1–7 при уровнях значимости 0,1; 1; 2; 5; 20; 50 % соответственно.

При проведении исследований принимается решение о существовании реального эффекта при статистической мощности не менее 0,8, что соответствует 80 % вероятности утверждения «Ложная нулевая гипотеза верно отвергнута».

Несмотря на явно выраженную зависимость скорости уменьшения вероятности β при увеличении расстояния между гипотезами r'_0 от угла положения ϕ'_0 нулевой гипотезы относительно альтернативной гипотезы, существуют характерные расстояния r'_β между гипотезами для заданного уровня значимости α энтропийного критерия, при которых вероятность возникновения ошибки второго рода практически не зависит от угла положения ϕ'_0 гипотезы H_0 . Для расчета расстояния r'_β при задании уровня значимости в указанном диапазоне получено аппроксимирующее выражение вида

$$r'_\beta(\alpha) = \sqrt{-2 \cdot \ln(\alpha)} \cdot (1 + C_0 \cdot (\exp(C_1 \cdot \alpha) - C_2)), \quad (13)$$

где C_0 , C_1 и C_2 – варьируемые коэффициенты: для распределения Лапласа $C_0 = 0,06$, $C_1 = 3,35$ и $C_2 = 1$; для нормального распределения $C_0 = 0,025$, $C_1 = 4,6$ и $C_2 = 1$; для равномерного распределения $C_0 = 0,0085$, $C_1 = 6,3$ и $C_2 = 4$.

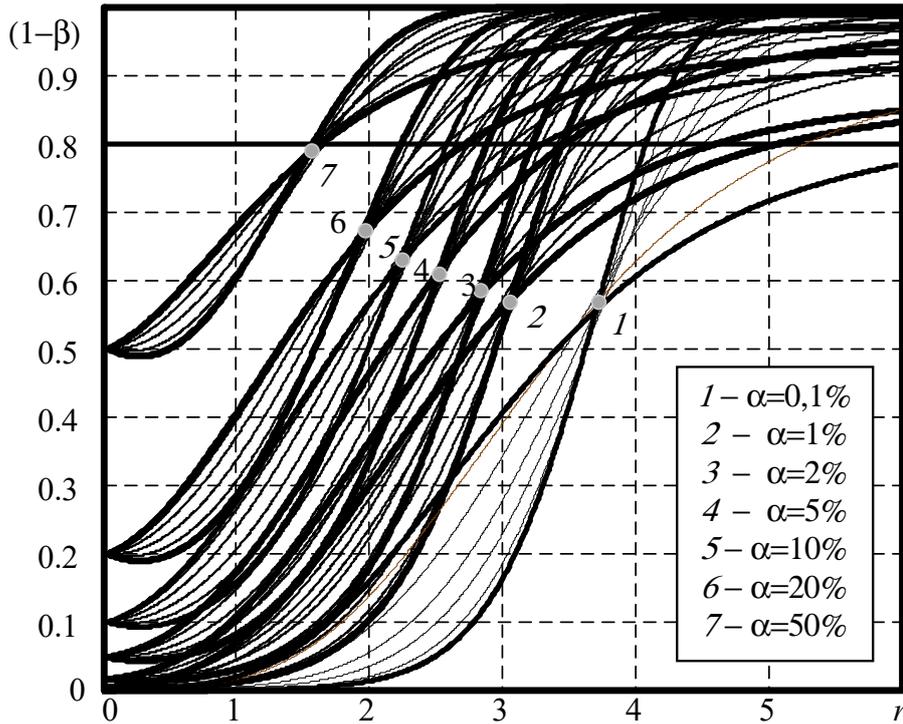


Рис. 3. Графики зависимости мощности $(1 - \beta)$ энтропийно-параметрического критерия от модуля расстояния между альтернативной и нулевой гипотезами при различных уровнях значимости α критерия

Заключение

На основе анализа приведенного пространства, центрированного относительно альтернативной гипотезы H_1 , получено выражение для расчета вероятности возникновения ошибки второго рода. В частности, установлена анизотропия мощности критерия в пространстве приведенных оценок ξ' и η' коэффициента энтропии и контрэксцесса, центрированных относительно альтернативной гипотезы. Найдены значения мощности $(1 - \beta(r'_\beta))$ критерия, при которых анизотропными свойствами приведенного пространства можно пренебречь. Получена приближенная зависимость расстояния r'_β от уровня значимости α , при которых мощность критерия $(1 - \beta)$ не зависит от угла положения φ' нулевой гипотезы в центрированном относительно альтернативной гипотезы пространстве.

Полученные зависимости для мощности энтропийно-параметрического критерия расширяют статистические методы системного анализа сложного объекта и могут быть использованы как для его оптимизации и управления, так и для принятия управленческих решений на основе статистической обработки контролируемых параметров.

Список литературы

1. Соколов Г. А., Гладких И. М. Математическая статистика. М. : Экзамен, 2007. 431 с.

2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
3. Hays W. *Statistics*. Cengage Learning, 1994. 848 p.
4. Полосин В. Г., Першенков П. П. Информационный способ проверки гипотез несимметричных распределений // Измерительная техника. 2013. № 12. С. 8–10.
5. Polosin V. G., Pershenkov P. P. Information – theoretic method for hypothesis testing with nonsymmetrical distributions // *Measurement Techniques*. 2014. Vol. 56, № 12. P. 1318–1322.
6. Полосин В. Г. Энтропийно-параметрический критерий проверки статистических гипотез // Современные проблемы отечественной медико-биологической и фармацевтической промышленности : тр. III Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2013. С. 230–356.
7. Полосин В. Г. Энтропийно-параметрический критерий для проверки статистических гипотез // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 3. С. 31–44.
8. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М. : Наука, 1973.
9. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2nd ed. Routledge, 1988. 590 p.
10. Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б., Постовалов С. Н. Мощность критерия согласия при близких альтернативах // Измерительная техника. 2007. № 2. С. 22–27.
11. Степанова М. Д. Проверка статистических гипотез. Минск : БГУИР, 2000. 36 с.
12. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л. : Энергоатомиздат, 1985. 284 с.
13. Волчихин В. И., Иванов А. И., Пашенко Д. В., Ахметов Б. Б., Вятчанин С. Е. Перспектива создания циклической континуально-квантовой хи-квадрат машины для проверки статистических гипотез на малых тестовых выборках биометрических данных и данных иной природы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 1. С. 5–15. doi:10.21685/2072-3059-2017-1-1

References

1. Sokolov G.A., Gladkikh I.M. *Matematicheskaya statistika = Math statistic*. Moscow: Ekzamen, 2007:431. (In Russ.)
2. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: FIZMATLIT, 2006:816. (In Russ.)
3. Hays W. *Statistics*. Cengage Learning, 1994:848.
4. Polosin V.G., Pershenkov P.P. An informational method for testing hypotheses of asymmetric distributions. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2013;(12):8–10. (In Russ.)
5. Polosin V.G., Pershenkov P.P. Information – theoretic method for hypothesis testing with nonsymmetrical distributions. *Measurement Techniques*. 2014;56(12):1318–1322.
6. Polosin V.G. Entropy-parametric criterion for testing statistical hypotheses. *Sovremennye problemy otechestvennoy mediko-biologicheskoy i farmatsevticheskoy promyshlennosti: tr. III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modern issues of the domestic biomedical and pharmaceutical industry: proceedings of the 3rd International scientific and practical conference*. Penza, 2013:230–356. (In Russ.)
7. Polosin V.G. Entropy-parametric criterion for testing statistical hypotheses. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2019;(3):31–44. (In Russ.)
8. Kendall M., St'yuart A. *Statisticheskie vyvody i svyazi = Statistical inference and relationships*. Moscow: Nauka, 1973. (In Russ.)

9. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2nd ed. Routledge, 1988:590.
10. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Postovalov S.N. Power of goodness-of-fit test for close alternatives. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2007;(2):22–27. (In Russ.)
11. Stepanova M.D. *Proverka statisticheskikh gipotez = Testing statistical hypotheses*. Minsk: BGUIR, 2000:36. (In Russ.)
12. Novitskiy P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy = Estimation of errors in measurement results*. Leningrad: Energoatomizdat, 1985:284. (In Russ.)
13. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Pashchenko D.V., Akhmetov B.B., Vyatchanin S.E. The prospect of creating a cyclic continuum-quantum chi-square machine for testing statistical hypotheses on small test samples of biometric data and data of a different nature. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(1):5–15. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059–2017-1-1

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Германович Полосин

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры медицинской
кибернетики и информатики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: polosin-vitalij@yandex.ru

Vitaliy G. Polosin

Doctor of engineering sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of medical cybernetics and informatics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.12.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.12.2021

Принята к публикации / Accepted 15.01.2022

УДК 004.896

doi:10.21685/2072-3059-2022-1-3

Искусственный интеллект и создание сложных организационно-технических систем (Часть II)

М. Ю. Бабич

Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

babichmj@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрены сложные организационно-технические системы с элементами искусственного интеллекта, т.е. системы, в процессе функционирования которых решаются нетрадиционные задачи, связанные с творческими способностями человека. Поставлена задача доказать, что понятие искусственного интеллекта является относительным и зависит от наблюдателя, что может способствовать изменению современного взгляда исследователей на вопросы достижения в сложных организационно-технических системах возможностей искусственного интеллекта. *Материалы и методы.* Рассмотрено понятие рационального агента, не совершающего ошибок. Показана близость введенного понятия к носителю искусственного интеллекта в слабом смысле. Приведены аксиомы принадлежности рационального агента нескольким системам одновременно. Сложные организационно-технические системы анализируются в качестве многоагентных систем. *Результаты.* Проанализированы свойства организационно-технических систем, в контуре которых функционируют дисрациональные агенты, т.е. агенты, поведение которых не является рациональным. Доказано, что при соблюдении введенных аксиом принадлежности агентов системам понятие рациональности зависит от той системы, в которой находится наблюдатель, и от периода времени наблюдения. Рассмотрены нелинейные системы, к которым относятся многие организационно-технические системы. Доказано отсутствие адекватного аппарата прогнозирования в период наступления хаоса. *Выводы.* Установлено, что понятие рационального или дисрационального агента и, следовательно, понятие искусственного интеллекта в слабом смысле являются относительными. Определена стратегия создания и развития организационно-технических систем при выполнении предложенных аксиом и справедливости рассмотренных предположений.

Ключевые слова: организационно-техническая система, искусственный интеллект, многоагентная система, рациональный агент, синергетика, аттрактор, хаос

Для цитирования: Бабич М. Ю. Искусственный интеллект и создание сложных организационно-технических систем (Часть II) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 32–41. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-3

Artificial intelligence and creation of complex organizational and technical systems (Part 2)

M.Yu. Babich

Research and Production Enterprise “Rubin”, Penza, Russia

babichmj@mail.ru

Abstract. *Background.* Complex organizational and technical systems with elements of artificial intelligence are considered, that is, systems, in the course of their functioning, unconventional tasks related to human creative abilities are solved. The task is to prove the concept of artificial intelligence is relative and depends on the observer, which can contribute to a change in the modern view of researchers on the issues of achieving artificial intelligence capabilities in complex organizational and technical systems. *Materials and methods.* The concept of a rational agent that does not make mistakes is considered. The closeness of the introduced concept to the carrier of artificial intelligence in a weak sense is shown. The axioms of a rational agent belonging to several systems simultaneously are considered. Complex organizational and technical systems are considered as multi-agent systems. *Results.* The properties of organizational and technical systems, in the contour of which dysrational agents function, that is, agents whose behavior is not rational, are analyzed. It is proved that if the introduced axioms of agents' belonging to systems are observed, the concept of rationality depends on the system in which the observer is located and on the observation time period. Nonlinear systems, which include many organizational and technical systems, are considered. The absence of an adequate forecasting apparatus during the onset of chaos is proved. *Conclusions.* It has been established that the concept of a rational or dysrational agent and, therefore, the concept of artificial intelligence in a weak sense is relative. The strategy for the creation and development of organizational and technical systems is determined while fulfilling the proposed axioms and the validity of the considered assumptions.

Keywords: organizational and technical system, artificial intelligence, multi-agent system, rational agent, synergetics, attractor, chaos

For citation: Babich M.Yu. Artificial intelligence and creation of complex organizational and technical systems (Part 2). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):32–41. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-3

Введение

Во многих отраслях народного хозяйства РФ и зарубежных стран большое значение приобретает внедрение сложных организационно-технических систем (ОТС) с элементами искусственного интеллекта (ИИ). Однако анализ работ ведущих специалистов в области ИИ показывает отсутствие единого мнения исследователей в вопросе создания полноценного ИИ. В этом случае разработчикам ОТС необходимо отбросить трудную проблему создания ИИ по Чалмерсу [1], остановиться только на решении легкой проблемы, рассматривая лишь обработку информации, пытаться приблизиться к ИИ, создавая системы с элементами ИИ, оставаясь в пределах обычных вычислительных алгоритмов.

Однако на этом пути развития ОТС существуют другие проблемы, которые в работе определены в качестве «второй задачи». Возникают вопросы: зависит ли понятие ИИ от наблюдателя, т.е. является ли оно не относительным; в какой мере можно прогнозировать поведение человека (и, следовательно, изменения состояния ОТС) на основе рациональных математических или имитационных моделей?

Вторая задача

Важным отличием ОТС от других систем является наличие в их контуре людей. Деятельность каждого человека зависит от многочисленных параметров, наличие которых оказывает на него влияние в той или иной степени.

Проектировщики ОТС, как и при проектировании любой другой системы, отбрасывают значительное количество входных параметров и останавливаются лишь на базовых параметрах, оказывающих, по их мнению, наибольшее влияние на систему, включая человека. По существу ОТС – это многоагентная система. Агент моделирует деятельность человека или группы людей (в зависимости от масштаба моделирования). Даже если не происходит реализации модели ОТС, все равно деятельность человека в виде функционирования агентов всегда находится в ментальных образах проектировщиков. При этом предполагается, что агент является рациональным (интеллектуальным) агентом. Понятие рационального агента с годами уточнялось и расширялось. Остановимся на самой общей формулировке.

Рациональный агент – агент (нечто воспринимающее и действующее в некоторой среде), который действует таким образом, чтобы можно было достичь наилучшего результата или в условиях неопределенности наилучшего ожидаемого результата [2]. Другими словами, в деятельности рационального агента реализуются элементы поведения ИИ.

ОТС создается для рациональных агентов, функционирующих в ее контуре, для лиц, принимающих решение, которые управляют ОТС и также являющихся рациональными агентами. Если во внешней среде имеют место столкновение, соперничество нескольких ОТС, то предполагается, что и конкурирующие ОТС включают в себя рациональных агентов.

В работах [3, 4] Г. Саймоном была введена концепция ограниченной рациональности, а еще раньше в [5] рассматривалось близкое понятие иррациональности. Выяснилось, что «дисрациональное» поведение человек осуществляет даже при высоком показателе интеллекта [6], и, следовательно, модели рационального поведения человека не адекватны действительности. Дисрациональное поведение оказывает существенное влияние на экономические показатели рынка, предприятий, государств, на результаты голосований, политическое поведение граждан и в целом на функционирование ОТС [7–14].

В статье [15] показано, что деятельность человека осуществляется в рамках его картины Мира. Является ли иррациональность следствием ошибочной картины Мира человека? Как моделировать иррациональное поведение для ОТС? В качестве случайной ошибки, равновероятной по всем вариантам? Или какие-то варианты отказа в рациональном (интеллектуальном) поведении имеют большую вероятность? Если да, то какие?

В дальнейшем, чтобы показать всю сложность проблемы, будем считать, что человек в любой системе, в любой ОТС действует рационально и ИИ, или наша модель деятельности человека – рациональный (интеллектуальный) агент, – помещен в среду, в которой он не допускает ошибок, что приближает его к идеальной реализации ИИ в слабом смысле, т.е. для которого решена легкая проблема по Чалмерсу.

Так как наш Мир разнообразен и деятельность человека (агента) разнотипна, то в условиях, когда агент может самостоятельно организовывать новые ОТС, переходить из одной ОТС в другую, выбирать новую ОТС для вхождения в нее, можно предположить, что любой агент принадлежит одновременно нескольким системам. Например, студент-вечерник одновременно принадлежит ОТС «ВУЗ» и ОТС «Предприятие», в которой он работает.

Комбатант принадлежит военизированному отряду и семье. Оператор производственного процесса принадлежит некой виртуальной системе, приборы сканирования которой отражают характеристики процесса, и реальному предприятию, в котором протекает производственный процесс (в случае отказа или ошибок одного из приборов системы будут функционировать по-разному).

Используем следующие обозначения: u – агент; S – система; W – суперсистема, которой принадлежат системы, например: рабочий, завод, государство; $P_u(T)$ – цель агента; $P_S(T)$ – цель системы, ради которой функционирует система S ; T – период времени, за который должны достигаться поставленные цели. Исходя из цели $P_S(T)$ подсистема управления системой S определяет цели каждого агента $P_u(T)$, принадлежащего системе S .

Агент принадлежит системе (или система принадлежит суперсистеме), если:

- цель функционирования агента $P_u(T)$ (системы $P_S(T)$) является частью цели функционирования системы S (суперсистемы W);
- система S (суперсистема W) снабжает ресурсами агента u (систему S);
- при попытке достижения цели агент (система) взаимодействует с элементами системы (суперсистемы).

Можно доказать свойства рефлексивности и транзитивности определенной принадлежности.

Введем следующие аксиомы.

Аксиома 1. Каждый агент принадлежит одновременно нескольким системам, которые могут (в общем случае) принадлежать разным суперсистемам. Системы, которым агент принадлежит одновременно, не являются подсистемами друг друга:

$$(\forall a \in A) \wedge (\exists S_1, \exists S_2) \wedge (a \in S_1) \wedge (a \in S_2) \wedge (S_1 \neq S_2) \wedge (S_1 \not\subset S_2) \wedge (S_2 \not\subset S_1) \wedge (S_1 \subseteq W_1) \wedge ((S_2 \subseteq W_1) \vee (S_2 \subseteq W_2)). \quad (1)$$

Аксиома 2. Цели систем, которым агент принадлежит одновременно, не совпадают:

$$P_{S_1} \neq P_{S_2}. \quad (2)$$

Более подробно описанное рассмотрено в [16–18].

Пусть агент принадлежит одновременно двум системам S_1, S_2 , которые ставят агенту цели достижения $P^{S_1}_u(T)$ и $P^{S_2}_u(T)$ исходя из своих целей $P_{S_1}(T), P_{S_2}(T)$. Так как $P_{S_1}(T) \neq P_{S_2}(T)$, то возможно, что $P^{S_1}_u(T) \neq P^{S_2}_u(T)$.

В определенный период времени у агента может быть достаточно ресурсов, времени, желания выполнять действия по достижению двух целей одновременно. В другой период ресурсы агента или условия его функционирования могут этого не позволить. Тогда агент должен выбрать для себя более приоритетную систему и выполнять действия для достижения только ее цели. Другую цель агент должен игнорировать или пытаться достичь ее не полностью.

Если принять введенные аксиомы, то рациональность агентов будет зависеть от времени наблюдения и от того, в какой системе находится наблюдатель, т.е. понятие рациональности относительно. Докажем это.

Обозначим через $a(t)$ действие агента в момент времени t . Предположим, что агент принадлежит одновременно двум системам: S_1, S_2 и $P_{S_1} \neq P_{S_2}$. Будем рассматривать период $T = [t_s, t_f]$, $t \in T$. Предположим, что в период $[t_s, t^*]$, $t^* < t_f$, агент в состоянии выполнять действия по достижению двух целей $P_{S_1}^{S_1}(T)$ и $P_{S_2}^{S_2}(T)$ одновременно. Его траектория действий на интервале $[t_s, t^*]$ будет выглядеть следующим образом:

$$u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_m), \quad (3)$$

где $t_1 = t_s, t_m = t^*$.

Если в период $(t^*, t_f]$ условия функционирования изменились и агент выбрал приоритетную систему, например S_1 , то агент будет выполнять действия только для достижения цели $P_{S_1}^{S_1}(T)$. Цель $P_{S_2}^{S_2}(T)$, поставленная системой S_2 , будет проигнорирована. Траектория действий агента в период $(t^*, t_f]$ будет выглядеть следующим образом:

$$u(t_{m+1}), u(t_{m+2}), \dots, u(t_f). \quad (4)$$

Действия агента в интервале $[t_s, t^*]$ рациональны для любого наблюдателя. В период $(t^*, t_f]$ агент рационален для наблюдателя, находящегося в системе S_1 , и иррационален для наблюдателя в системе S_2 . Сам агент u считает себя всегда рациональным.

Например, студент-вечерник вследствие большого объема работы на предприятии может пропустить вечерние занятия в ОТС «ВУЗ». Для наблюдателя, находящегося в ОТС «ВУЗ» (декан), его действия иррациональны, для наблюдателя, находящегося в ОТС «Предприятие» (руководство предприятия), – рациональны.

Таким образом, понятие рационального агента, не совершающего ошибок, а вслед за тем и понятие ИИ в слабом смысле являются относительными. Более подробно это предположение доказано в [19].

Введенные аксиомы оказывают скрытое влияние на функционирование ОТС, но не всегда и не на все [16]. Для простоты дальнейшего изложения откажемся от них. Рассмотрим проблему ИИ в парадигме синергетики [20–24]. В качестве носителя ИИ в слабом смысле по-прежнему будем рассматривать рационального агента, пытающегося не совершать ошибок. Заметим, что сам агент является простой ОТС, но в нашем случае неделимой на другие подсистемы, в отличие от многоагентных ОТС. Если суперсистемы ограничивают класс ОТС сверху, то агент – снизу.

Проанализируем проблему хаоса.

Рассматривая проблему сознания, Дж. Серл в [25] ввел понятие Фона. Фон состоит из психических способностей, диспозиций, установок, манер поведения, ноу-хау и т.д. Человек функционирует в области Фона, а Фон обусловлен тем, что, хотя человек ограничен в пространстве и во времени, любая реальная ситуация допускает бесконечное число описаний и любое описание всегда неполно. Пространство (наш мир) так огромно, что для деятельности любого интеллекта его можно считать бесконечным. Аналогично со временем.

Тем не менее человек пространственно ограничен и существует на ограниченном временном отрезке. Время, отведенное на решение задач прогноза, еще более ограничено. Конечный и ограниченный человек физически может создавать лишь конечные и ограниченные устройства. Исследуемая им математическая бесконечность только ментальна. Следовательно, рациональный агент, чья деятельность реализована программно и/или технически, также ограничен в пространстве и во времени.

Таким образом, человек и создаваемые им технические устройства или реализованные на них рациональные агенты являются объектами, ограниченными в пространстве и во времени, но существующими в неограниченном пространстве и времени. Человек может благодаря опыту и знаниям, накопленным человечеством и переданным ему предыдущими поколениями на генном уровне, а также в качестве рукописей, библиотек, баз данных, традиций, идеологий, расширить временные рамки. Но это не снимает проблемы ограниченности.

Обозначим через $S_{x_1, x_2, \dots, x_n}(t_j)$ состояние ОТС S , включая людей, входящих в ее контур, в момент времени t_i . ОТС рассматриваем как объект, зависящий от параметров x_1, x_2, \dots, x_n . Здесь $t_i \in T$. Ее траектория в пространстве состояний будет иметь вид

$$S_{x_1, x_2, \dots, x_n}(t_1), S_{x_1, x_2, \dots, x_n}(t_2), \dots, S_{x_1, x_2, \dots, x_n}(t_f). \quad (5)$$

Модель ОТС S^M , которая нужна для прогнозирования изменений состояний системы S , будет иметь траекторию

$$S^M_{x_1, x_2, \dots, x_k}(t_1), S^M_{x_1, x_2, \dots, x_k}(t_2), \dots, S^M_{x_1, x_2, \dots, x_k}(t_f). \quad (6)$$

В траекториях (5) и (6) значение k меньше n , $k < n$, так как всегда происходит абстрагирование от реальности и уменьшение числа базовых параметров, от которых зависит состояние ОТС.

В синергетике рассматриваются нелинейные системы. Для систем, не являющихся сложными ОТС, сводимость модели ОТС к линейной может быть еще допустима, но для сложных ОТС такое допущение делает модель не адекватной реальности. Для нелинейных систем состояние хаоса не является чем-то необычным. Некоторые ОТС проектируются специально для функционирования в период хаоса, например ОТС силовых структур [26]. Уже в [27] отмечалась своеобразность логики войны, было введено понятие «трение войны».

В период хаоса неожиданно возникает большое число параметров, небольшое изменение которых вызывает значительное изменение в траектории нелинейных ОТС. Возникает ситуация, когда k становится значительно меньше n , $k \ll n$, в реальности $n = \infty$. Имеют место неполнота и неопределенность входных данных. Режим функционирования системы становится неустойчивым. Это явление характерно для странных аттракторов: точек притяжения в фазовом пространстве системы, в окрестности которых малые возмущения входных параметров приводят к экспоненциальному нарастанию изменений в траекториях состояний системы. В этих условиях перестают корректно работать модели, необходимые для прогнозирования развития си-

туации. В работе [28] отмечается, что можно исследовать свойства разных странных аттракторов в условиях неопределенности и неполноты информации. В нелинейных системах можно понять динамические причины явлений, но нет возможности для прогноза их наступления. Как прийти к тому или иному состоянию – невозможно определить.

Если ρ – степень близости, то получаем, что для периода T

$$\rho(S_{x_1, x_2, \dots, x_k}^M(t_i), S_{x_1, x_2, \dots, x_n}(t_i)) \gg \varepsilon, \quad (7)$$

где ε – значение приемлемой ошибки прогноза.

Сложно прогнозировать изменение состояния ОТС не потому, что чего-то не знаем или используемые модели некорректны, а, скорее всего, потому, что пытаемся исследовать процессы, протекающие в нелинейных системах, не поддающихся алгоритмизации в силу бесконечного числа возможных вариантов.

Рациональный агент, ИИ, ОТС не могут функционировать без какого-либо прогноза развития текущей ситуации, однако существуют периоды их функционирования, в которых это обеспечить невозможно.

Заключение

Так как у исследователей в соответствующих областях науки нет единства по поводу вопросов создания ИИ, сознания, вычислимости окружающей действительности, следует констатировать, что в таких условиях невозможно разработать четкую программу для разработчиков ОТС по постепенному усложнению ОТС и переходу все к более и более сложным и интеллектуальным ОТС. Разработчикам ОТС следует избегать работ по моделированию специфических функций сознания. Необходимо пытаться приблизиться к ИИ, создавая системы с элементами ИИ. Это относится только к ОТС, на разработку которых отводится не более 5–7 лет.

Как следует из результатов исследования, ИИ, для которого решена легкая проблема по Чалмерсу, не может быть всегда рационален, т.е. всегда работать без ошибок. Относительно и зависит от наблюдателя понятие рационального агента (упрощенного ИИ), помещенного в контур ОТС. Моделирование действий человека рациональным агентом играет важную роль в системах поддержки принятия решений. Возможно, поэтому с большим трудом происходит *реальное* внедрение результатов диссертационных работ, связанных с созданием систем поддержки принятия решений. Следовательно, необходимо искать другие подходы в прогнозировании изменения состояний ОТС, например [29].

Список литературы

1. Чалмерс Д. Сознательный ум. В поисках фундаментальной теории. М. : Либроком, 2019. 512 с.
2. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. М. : Вильямс, 2006. 1048 с.
3. Simon H. Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Processes in Administrative Organizations. New York, Macmillan, 1957. 198 p.
4. Simon H. Rationality as Process and as Product of Thought. Richard T. Ely Lecture // American Economic Review. 1978. Vol. 68, № 2. P. 1–16.

5. Becker G. S. Irrational Behavior and Economic Theory // Journal of Political Economy. 1962. Vol. 70. P. 1–13.
6. Станович К. Рациональное мышление. М. : Карьера Пресс, 2016. 352 с.
7. Tversky A., Kahneman D. Judgement Under Uncertainty: Heuristics and Biases // Science. 1974. № 185. P. 1124–1131.
8. Gigerenzer G., Selten R. Bounded rationality: the adaptive toolbox. Cambridge : MIT Press, 2002. 394 p.
9. Tirole J. Rational irrationality: Some economics of self-management // European Economic Review. 2002. Vol. 46. P. 633–655.
10. Martinelli C. Would rational voters acquire costly information? // Journal of Economic Theory. 2006. Vol. 129, iss. 1. P. 225–251.
11. Акерлоф Дж., Шиллер Р. Spiritus Animalis, или как человеческая психология управляет экономикой и почему это важно для мирового капитализма. М. : Юнайт-ед Пресс, 2010. 273 с.
12. Wooldridge M. Reasoning about rational agents. Cambridge : MIT Press, 2010. 232 p.
13. Канеман Д. Думай медленно... решай быстро. М. : АСТ, 2013. 710 с.
14. Кузнецов О. П. Ограниченная рациональность и принятие решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. № 1. С. 3–15.
15. Осипов Г. С., Чудова Н. В., Панов А. И., Кузнецова Ю. М. Знаковая картина мира субъекта поведения. М. : Физматлит, 2018. 264 с.
16. Бабич М. Ю. Вопросы применения аксиом принадлежности агентов нескольким многоагентным системам в исследовании функционирования организационных и организационно-технических систем // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 12. С. 56–63.
17. Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Бабич А. М. Принадлежность агентов нескольким системам: аксиомы, рефлексивность, прогнозирование // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 1. С. 24–29.
18. Бабич М. Ю. Общий алгоритм функционирования систем и агентов в случае выполнения условий аксиом принадлежности // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Серия: Технические науки. Информатика, вычислительная техника и управление. 2016. № 3 (31). С. 85–89.
19. Бабич М. Ю., Бабич А. М. Влияние аксиом принадлежности агентов нескольким организационно-техническим системам на рациональное поведение агентов // Искусственные общества. 2021. Т. 16. № 1. URL: <https://artsoc.jes.su/S207751800013885-2-1> (дата обращения: 30.03.2021).
20. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. М. : Прогресс, 1986. 432 с.
21. Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего. М. : Едиториал, 2003. 288 с.
22. Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Основания синергетики. Синергетическое мировоззрение. М. : Либроком, 2014. 256 с.
23. Малинецкий Г. Г. Математические основы синергетики: хаос, структуры, вычислительный эксперимент. М. : Либроком, 2015. 310 с.
24. Чернавский Д. С. Синергетика и информация: динамическая теория информации. М. : Либроком, 2015. 276 с.
25. Серл Дж. Открывая сознание заново. М. : Идея-Пресс, 2002. 256 с.
26. Арзуманян Р. Кромка Хаоса. Сложное мышление и сеть: парадигма нелинейности и среда безопасности XXI века. М. : Регнум, 2012. 600 с.
27. Клаузевиц К. О войне. М. : Государственное военное издательство, 1934. 692 с.
28. Майнцер К. Сложносистемное мышление: материя, разум, человечество. Новый синтез. М. : Либроком, 2009. 464 с.
29. Бабич М. Ю., Бахтияров Р. Ж., Гришанин Е. Г., Кузнецов В. Е., Чувашов А. А. Имитационное макетирование для специализированных организационно-технических систем // Радиопромышленность. 2021. Т. 31, № 1. С. 56–64.

References

1. Chalmers D. *Soznayushchiy um. V poiskakh fundamental'noy teorii = Conscious mind. In search of a fundamental theory.* Moscow: Librokom, 2019:512. (In Russ.)
2. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod = Artificial intelligence. Modern approach.* Moscow: Vil'-yams, 2006:1048. (In Russ.)
3. Simon N. *Adshipistrative Behaviog: A Study of Decision-Making Processes in Adshin-istgtative Orgapizatiops.* New York, Macmillian, 1957:198.
4. Simon H. Rationality as Process and as Product of Thought. Richard T.Ely Lecture. *American Economic Review.* 1978;68(2):1–16.
5. Becker G.S. Irrational Behavior and Economic Theory. *Journal of Political Economy.* 1962;70:1–13.
6. Stanovich K. *Ratsional'noe myshlenie = Rational thinking.* Moscow: Kar'era Press, 2016:352. (In Russ.)
7. Tversky A., Kahneman D. Judgement Under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science.* 1974;(185):1124–1131.
8. Gigerenzer G., Selten R. *Bounded rationality: the adaptive toolbox.* Cambridge: MIT Press, 2002:394.
9. Tirole J. Rational irrationality: Some economics of self-management. *European Economic Review.* 2002;46:633–655.
10. Martinelli C. Would rational voters acquire costly information? *Journal of Economic Theory.* 2006;129(1):225–251.
11. Akerlof Dzh., Shiller R. *Spiritus Animalis, ili kak chelovecheskaya psikhologiya upravlyaet ekonomikoy i pochemu eto vazhno dlya mirovogo kapitalizma = Spiritus Animalis, or how human psychology controls the economy and why it is important for world capitalism.* Moscow: Yunayted Press, 2010:273. (In Russ.)
12. Wooldridge M. *Reasoning about rational agents.* Cambridge: MIT Press, 2010:232.
13. Kaneman D. *Dumay medlenno... reshay bistro = Think slow... decide fast.* Moscow: AST, 2013:710.
14. Kuznetsov O.P. Bounded rationality and decision making. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy = Artificial intelligence and decision making.* 2019;(1):3–15. (In Russ.)
15. Osipov G.S., Chudova N.V., Panov A.I., Kuznetsova Yu.M. *Znakovaya kartina mira sub"ekta povedeniya = The iconic picture of the world of the subject of behavior.* Moscow: Fizmatlit, 2018:264. (In Russ.)
16. Babich M.Yu. Issues of application of the axioms of belonging of agents to several multi-agent systems in the study of the functioning of organizational and organizational-technical systems. *Voprosy radioelektroniki = Questions of radio electronics.* 2018;(12):56–63. (In Russ.)
17. Babich M.Yu., Kuznetsov V.E., Babich A.M. Agents belonging to several systems: axioms, reflexivity, forecasting. *Radiopromyshlennost' = Radio industry.* 2020;30(1):24–29. (In Russ.)
18. Babich M.Yu. The general algorithm for the functioning of systems and agents in the case of the fulfillment of the conditions of the axioms of membership. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. Seriya: Tekhnicheskie nauki. Informatika, vychislitel'naya tekhnika i upravlenie = The 21st century: the results of the past and the problems of the present plus. Series: Engineering sciences. Informatics, Computer Engineering and Control.* 2016;(3):85–89. (In Russ.)
19. Babich M.Yu., Babich A.M. Influence of the axioms of belonging of agents to several organizational and technical systems on the rational behavior of agents. *Iskusstvennye obshchestva = Artificial societies.* 2021;16(1). (In Russ.). Available at: <https://artsoc.jes.su/S207751800013885-2-1> (accessed 30.03.2021).

20. Prigozhin I., Stengers I. *Poryadok iz khaosa: novyy dialog cheloveka s prirodoy = Order out of chaos: a new dialogue between man and nature*. Moscow: Progress, 1986:432. (In Russ.)
21. Kapitsa S.P., Kurdyumov S.P., Malinetskiy G.G. *Sinergetika i prognozy budushchego = Synergetics and future forecasts*. Moscow: Editorial, 2003:288. (In Russ.)
22. Knyazeva E.N., Kurdyumov S.P. *Osnovaniya sinergetiki. Sinergeticheskoe mirovoz-zrenie = Fundamentals of synergy. Synergetic worldview*. Moscow: Librokom, 2014:256. (In Russ.)
23. Malinetskiy G.G. *Matematicheskie osnovy sinergetiki: khaos, struktury, vychislitel'nyy eksperiment = Mathematical foundations of synergetics: chaos, structures, computational experiment*. Moscow: Librokom, 2015:310. (In Russ.)
24. Chernavskiy D.S. *Sinergetika i informatsiya: dinamicheskaya teoriya informatsii = Synergetics and information: dynamic information theory*. Moscow: Librokom, 2015:276. (In Russ.)
25. Serl Dzh. *Otkryvaya soznanie zanovo = Reopening consciousness*. Moscow: Ideya-Press, 2002:256. (In Russ.)
26. Arzumanyan R. *Kromka Khaosa. Slozhnoe myshlenie i set': paradigma nelineynosti i sreda bezopasnosti XXI veka = Edge of Chaos. Complex thinking and the network: the non-linearity paradigm and the security environment of the 21st century*. Moscow: Regnum, 2012:600. (In Russ.)
27. Klauzevits K. *O voyne = Talking about war*. Moscow: Gosudarstvennoe voennoe izdatel'stvo, 1934:692. (In Russ.)
28. Mayntser K. *Slozhnosistemnoe myshlenie: materiya, razum, chelovechestvo. Novyy sintez = Integrated systems thinking: matter, mind, humanity. New synthesis*. Moscow: Librokom, 2009:464. (In Russ.)
29. Babich M.Yu., Bakhtiyarov R.Zh., Grishanin E.G., Kuznetsov V.E., Chuvashov A.A. Simulation prototyping for specialized organizational and technical systems. *Radiopromyshlennost' = Radio industry*. 2021;31(1):56–64. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Юрьевич Бабич

доктор технических наук, доцент,
главный специалист, Научно-
производственное предприятие «Рубин»,
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: babichmj@mail.ru

Mikhail Yu. Babich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, key specialist, Research
and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 24.09.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 22.10.2021

Принята к публикации / Accepted 17.01.2022

УДК 004.056

doi:10.21685/2072-3059-2022-1-4

Аналитические модели временных характеристик процессов перехвата речевой информации и контроля защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам на объектах информатизации

Е. А. Маньков

Краснодарское высшее военное училище, Краснодар, Россия

eMankov@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются процессы перехвата речевой информации средствами акустической речевой разведки и процессы контроля ее защищенности от подобного рода угроз. Предметом исследования являются модели и методики реализации указанных процессов. Цель работы – повышение адекватности моделей процессов перехвата речевой информации средствами разведки и процессов контроля ее защищенности от утечки по техническим каналам на объектах информатизации, а также показателей эффективности указанных процессов. *Материалы и методы.* Методический аппарат функционального моделирования ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing – интеграция компьютерных и промышленных технологий) в рамках методологии SADT (Structured Analysis and Design Technique – структурный анализ и проектирование систем), теория вероятностей, системный анализ. *Результаты.* Получены аналитические модели временных характеристик процессов перехвата речевой информации средствами акустической речевой разведки на объектах информатизации и процессов контроля защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам на объектах информатизации.

Ключевые слова: речевая информация, объект информатизации, аналитическая модель, временные характеристики

Для цитирования: Маньков Е. А. Аналитические модели временных характеристик процессов перехвата речевой информации и контроля защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам на объектах информатизации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 42–52. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-4

Analytical models of temporal characteristics of the intercepting speech information's processes and monitoring the speech information's protection from leakage through technical channels at informatization facilities

E.A. Man'kov

Krasnodar Higher Military School, Krasnodar, Russia

eMankov@inbox.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is the interception of speech information's processes by means of acoustic speech reconnaissance and the processes of monitoring its protection from such threats. The subject of the research is the models and methods for the

implementation of these processes. The purpose of the work is to increase the adequacy of the models of the processes of intercepting speech information by means of reconnaissance and the processes of monitoring its security from leakage through technical channels at informatization objects, as well as indicators of the effectiveness of these processes. *Materials and methods.* Methodological apparatus of functional modeling ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing) within the framework of SADT (Structured Analysis and Design Technique) methodology, probability theory, system analysis. *Results.* Analytical models of the temporal characteristics of the processes of interception of speech information by means of acoustic speech reconnaissance at the objects of informatization and the processes of monitoring the security of speech information from leakage through technical channels at the objects of informatization are obtained.

Keywords: speech information, object of informatization, analytical model, time characteristics

For citation: Man'kov E.A. Analytical models of temporal characteristics of the intercepting speech information's processes and monitoring the speech information's protection from leakage through technical channels at informatization facilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):42–52. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-4

Введение

Речь является базовым, тождественным средством коммуникации между людьми, что обуславливает актуальность и непреложность задачи обеспечения ее конфиденциальности. К существенным свойствам речи как информационного процесса можно отнести ее оперативность, избыточность, идентифицируемость. Очевидно, что данные свойства напрямую влияют как на процессы перехвата речевой информации (РИ), так и на процессы контроля ее защищенности от утечки по техническим каналам. Однако большинство моделей и методик контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам, реализующих информационный подход, основаны на изучении свойства избыточности. Тем не менее параметр времени реализации процессов перехвата РИ средствами акустической речевой разведки (АР-Р) на объектах информатизации (ОИ) и процессов контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ, также должен быть учтен, что позволит повысить адекватность их моделей.

Согласно [1] к основным видам технических каналов утечки РИ относятся:

- акустический (перехват РИ микрофонами воздушной проводимости);
- виброакустический (перехват РИ виброакустическими преобразователями (электронными стетоскопами));
- акустоэлектрический (перехват акустоэлектрических преобразований элементов, входящих в состав технических средств);
- акустооптический (перехват РИ посредством зондирования окон лазерными микрофонами, а также за счет акустооптических преобразований в системах волоконно-оптических линий связи);
- параметрический (перехват РИ за счет высокочастотного навязывания, а также за счет побочных электромагнитных излучений и наводок технических средств на частотах ВЧ-генераторов, модулированных информационным сигналом).

Широкий перечень угроз утечки РИ по техническим каналам на ОИ [2–4], а также их информационный по своей сути характер обуславливает подход к моделированию процессов перехвата РИ средствами АР-Р и процессов контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ как информационных процессов.

Функциональное моделирование исследуемых процессов

Комплексное моделирование исследуемых информационных процессов сопряжено с необходимостью их функционального описания [5]. В основу формирования аналитических моделей временных характеристик процессов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ и процессов контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ положена декомпозиционная структура функциональных моделей указанных процессов, которая является результатом их первичной формализации. Функциональные модели построены на основе методического аппарата ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing), сущность которого заключается в декомпозиции целевой предметной функции на функции каждого последующего уровня декомпозиции до получения элементарных функций. На рис. 1 показан пример такой декомпозиционной структуры.

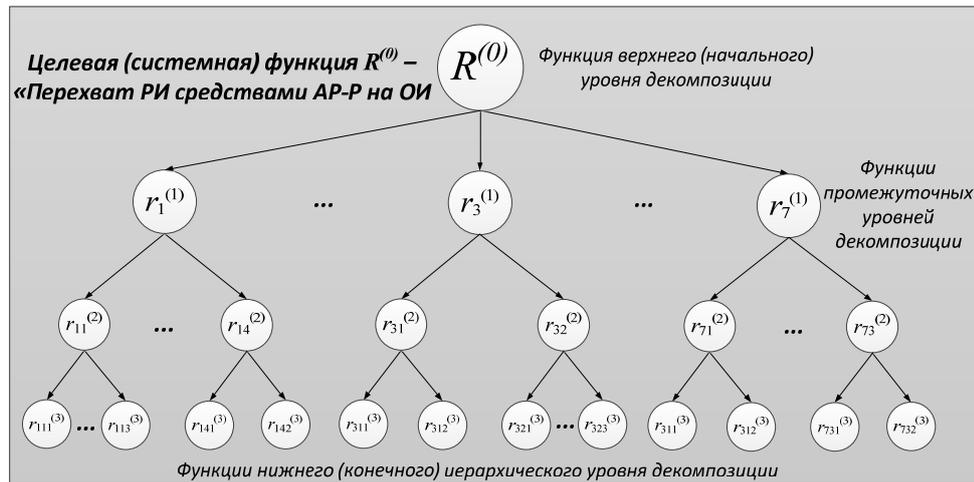


Рис. 1. Формирование декомпозиционной структуры функционального описания процессов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ

Структура связей представляет собой варианты последовательности выполнения процессов: последовательное, параллельное и их комбинации (рис. 2) (пунктиром обозначены смежные процессы).

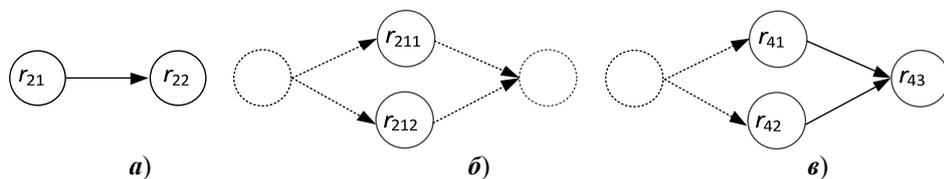


Рис. 2. Варианты последовательности выполнения процессов: *а* – последовательное; *б* – параллельное; *в* – комбинированное

Формирование аналитических моделей временных характеристик исследуемых процессов

Воспользуемся выражениями для определения средних значений композиций случайных величин исследуемых характеристик [6]. В качестве таких характеристик будем использовать время реализации процессов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ и процессов контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ.

Для определения среднего значения времени реализации композиционно связанных функций $f_1^{(n)}, f_2^{(n)}, \dots, f_K^{(n)}$, в зависимости от последовательности их выполнения, имеют место следующие выражения:

$$\bar{\tau}(f^{(n)}) = M\left(\bar{\tau}(f_1^{(n+1)}) * \bar{\tau}(f_2^{(n+1)}) * \dots * \bar{\tau}(f_K^{(n+1)})\right) - \quad (1)$$

при последовательном выполнении, и

$$\begin{aligned} \bar{\tau}(f^{(n)}) = M\left(p_1^{(n+1)} \cdot \bar{\tau}(f_1^{(n+1)}) * p_2^{(n+1)} \cdot \bar{\tau}(f_2^{(n+1)}) * \dots \right. \\ \left. \dots * p_K^{(n+1)} \cdot \bar{\tau}(f_K^{(n+1)})\right) - \quad (2) \end{aligned}$$

при параллельном.

Здесь $\bar{\tau}(f_K^{(n)})$ – среднее значение (математическое ожидание)

случайной величины времени выполнения функции $f_K^{(n)}$; $M(\dots)$ – математическое ожидание от композиции случайных величин; $*$ – знак композиции случайных величин; $p_K^{(n)}$ – вероятность выполнения функции $f_K^{(n)}$; $f_K^{(n)}$ – k -я функция n -го уровня декомпозиции.

Исходя из аддитивности и линейности математического ожидания композиции случайных величин, даже в случае их взаимной зависимости [6, 7], выражения (1) и (2) представим в виде

$$\bar{\tau}(f^{(n)}) = \sum_{k=1}^K \bar{\tau}(f_k^{(n+1)}) \quad (3)$$

и

$$\bar{\tau}(f^{(n)}) = \sum_{k=1}^K p_K^{(n+1)} \cdot \bar{\tau}(f_K^{(n+1)}) \quad (4)$$

соответственно.

Перейдем непосредственно к формированию аналитических моделей временных характеристик процессов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ и процессов контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ. Рассмотрим формирование аналитических моделей временных харак-

теристик функций нулевого и первого декомпозиционного уровня функциональных моделей исследуемых процессов.

Согласно функциональной модели целевая функция R – функция перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ состоит из этапов $r_1^{(1)}$, $r_2^{(1)}$, $r_3^{(1)}$, $r_4^{(1)}$, $r_5^{(1)}$, $r_6^{(1)}$, $r_7^{(1)}$ перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ. Исходя из декомпозиционной структуры функциональной модели (рис. 3) этапы $r_1^{(1)}$ и $r_7^{(1)}$ выполняются в обязательном порядке, а реализация этапов $r_2^{(1)}$, $r_3^{(1)}$, $r_4^{(1)}$, $r_5^{(1)}$, $r_6^{(1)}$ носит вероятностный характер.

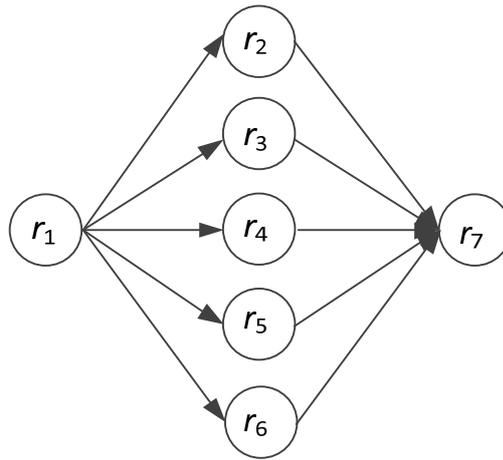


Рис. 3. Последовательность выполнения этапов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ

Таким образом, среднее значение (математическое ожидание) $\bar{\tau}(R)$ времени, затрачиваемого на реализацию целевой функции R перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ, определим по формуле

$$\bar{\tau}(R) = \bar{\tau}(r_1^{(1)}) + p_2 \cdot \bar{\tau}(r_2^{(1)}) + p_3 \cdot \bar{\tau}(r_3^{(1)}) + p_4 \cdot \bar{\tau}(r_4^{(1)}) + p_5 \cdot \bar{\tau}(r_5^{(1)}) + p_6 \cdot \bar{\tau}(r_6^{(1)}) + \bar{\tau}(r_7^{(1)}), \quad (5)$$

где $\bar{\tau}(r_1^{(1)})$ – среднее значение (математическое ожидание) времени реализации этапа $r_1^{(1)}$ – поиска мест разведдоступности РИ по прямому акустическому, виброакустическому, акустоэлектрическому, акустооптическому и параметрическому техническим каналам утечки; p_2 – вероятность реализации нарушителем этапа $r_2^{(1)}$; $\bar{\tau}(r_2^{(1)})$ – среднее значение (математическое ожидание) времени реализации этапа $r_2^{(1)}$ перехвата акустических сигналов ОИ по прямому акустическому (воздушному) каналу; p_3 – вероятность реализации этапа $r_3^{(1)}$; $\bar{\tau}(r_3^{(1)})$ – среднее значение (математическое ожидание) времени

реализации этапа $r_3^{(1)}$ перехвата вибрационных сигналов с ограждающих конструкций и элементов ИТС ОИ по виброакустическому каналу; p_4 – вероятность реализации этапа $r_4^{(1)}$; $\bar{\tau}(r_4^{(1)})$ – среднее значение (математическое ожидание) времени реализации этапа $r_4^{(1)}$ перехвата РИ ОИ по акустооптическому (лазерному) каналу; p_5 – вероятность реализации этапа $r_5^{(1)}$; $\bar{\tau}(r_5^{(1)})$ – среднее значение (математическое ожидание) времени реализации этапа $r_5^{(1)}$ перехвата РИ ОИ по акустоэлектрическому каналу; p_6 – вероятность реализации этапа $r_6^{(1)}$; $\bar{\tau}(r_6^{(1)})$ – среднее значение (математическое ожидание) времени реализации этапа $r_6^{(1)}$ перехвата РИ ОИ по параметрическому каналу; $\bar{\tau}(r_7^{(1)})$ – среднее значение (математическое ожидание) времени реализации этапа $r_7^{(1)}$ – анализа перехваченной информации на предмет ее достаточности.

Каждый из этапов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ состоит из методик работы со средствами АР-Р (функций второго уровня декомпозиции). Исходя из их отношений (последовательности реализации) формируются аналитические модели временных характеристик функций этапов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ:

$$\bar{\tau}(r_1^{(1)}) = \bar{\tau}(r_{11}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{12}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{13}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{14}^{(2)}), \quad (6)$$

$$\bar{\tau}(r_2^{(1)}) = \bar{\tau}(r_{21}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{22}^{(2)}), \quad (7)$$

$$\bar{\tau}(r_3^{(1)}) = \bar{\tau}(r_{31}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{32}^{(2)}), \quad (8)$$

$$\bar{\tau}(r_4^{(1)}) = p_{41} \cdot \bar{\tau}(r_{41}^{(2)}) + p_{42} \cdot \bar{\tau}(r_{42}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{43}^{(2)}), \quad (9)$$

$$\bar{\tau}(r_5^{(1)}) = p_{51} \cdot \bar{\tau}(r_{51}^{(2)}) + p_{52} \cdot \bar{\tau}(r_{52}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{53}^{(2)}), \quad (10)$$

$$\bar{\tau}(r_6^{(1)}) = p_{61} \cdot \bar{\tau}(r_{61}^{(2)}) + p_{62} \cdot \bar{\tau}(r_{62}^{(2)}) + p_{63} \cdot \bar{\tau}(r_{63}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{64}^{(2)}) \quad (11)$$

$$\bar{\tau}(r_7^{(1)}) = \bar{\tau}(r_{71}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{72}^{(2)}) + \bar{\tau}(r_{73}^{(2)}). \quad (12)$$

где $\bar{\tau}$ – среднее значение (математическое ожидание) времени реализации соответствующей функции; p – вероятность реализации соответствующей функции.

Далее согласно декомпозиционной структуре функциональной модели процессов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ формируются аналитические модели временных характеристик процедур низлежащих уровней декомпозиции вплоть до получения аналитических выражений, содержащих элементарные функции, временные характеристики которых могут быть оценены с заданной точностью.

Аналогичным образом формируются аналитические модели временных характеристик процессов контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ. Целевая функция Z представляет собой функцию реализации мероприятий контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ и декомпозиционно состоит из последовательно выполняемых этапов $z_i^{(1)}$ контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ, этапы состоят из методик $z_{ij}^{(2)}$ контроля РИ которые, в свою очередь, делятся на соответствующие им процедуры оценки $z_{ijk}^{(3)}$ с использованием специальных технических комплексов.

Для функций нулевого и первого уровня декомпозиции аналитические модели временных характеристик процессов контроля защищенности РИ представляются в следующем виде:

$$\bar{\tau}(Z) = \bar{\tau}(z_1^{(1)}) + \bar{\tau}(z_2^{(1)}) + \bar{\tau}(z_3^{(1)}) + \bar{\tau}(z_4^{(1)}) + \bar{\tau}(z_5^{(1)}) + \bar{\tau}(z_6^{(1)}), \quad (13)$$

$$\bar{\tau}(z_1^{(1)}) = \bar{\tau}(z_{11}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{12}^{(2)}), \quad (14)$$

$$\bar{\tau}(z_2^{(1)}) = \bar{\tau}(z_{21}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{22}^{(2)}), \quad (15)$$

$$\bar{\tau}(z_3^{(1)}) = \bar{\tau}(z_{31}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{32}^{(2)}), \quad (16)$$

$$\bar{\tau}(z_4^{(1)}) = \bar{\tau}(z_{41}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{42}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{43}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{44}^{(2)}), \quad (17)$$

$$\bar{\tau}(z_5^{(1)}) = \bar{\tau}(z_{51}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{52}^{(2)}), \quad (18)$$

$$\bar{\tau}(z_6^{(1)}) = \bar{\tau}(z_{61}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{62}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{63}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{64}^{(2)}) + \bar{\tau}(z_{65}^{(2)}), \quad (19)$$

где $\bar{\tau}$ – среднее значение (математическое ожидание) времени реализации соответствующей функции.

В выражениях (6)–(19) используются обозначения функций перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ и контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Обозначения функций перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ
и контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ

Обозначение функции	Наименование функции
1	2
$r_{11}^{(2)}$	Настройка технических средств (ТС) АР-Р
$r_{12}^{(2)}$	Определение местоположения источников информативных речевых сигналов
$r_{13}^{(2)}$	Определение зоны разведдоступности информативных речевых сигналов ОИ

Продолжение табл. 1

1	2
$r_{14}^{(2)}$	Определение мест оптимальной разведдоступности информативных речевых сигналов ОИ
$r_{21}^{(2)}$	Прием акустических речевых сигналов с помощью микрофонов воздушной проводимости
$r_{22}^{(2)}$	Повышение разборчивости принятых акустических речевых сигналов специальными программными методами
$r_{31}^{(2)}$	Измерение параметров вибрационных речевых сигналов с ограждающих конструкций и элементов инженерно-технических сооружений ОИ с помощью электронных стетоскопов
$r_{32}^{(2)}$	Повышение разборчивости перехваченных вибрационных речевых сигналов специальными программными методами
$r_{41}^{(2)}$	Измерение параметров информативных речевых сигналов с окон и иных отражающих поверхностей ОИ с помощью лазерно-акустических систем разведки
$r_{42}^{(2)}$	Измерение параметров информативных речевых сигналов за счет акустооптических преобразований в волоконно-оптических линиях связи
$r_{43}^{(2)}$	Повышение разборчивости информативных речевых (оптических) сигналов специальными программными методами
$r_{51}^{(2)}$	Измерение параметров информативных речевых сигналов путем высокочастотного навязывания (ВЧ-Н) в коммуникации ОИ
$r_{52}^{(2)}$	Измерение параметров информативных речевых сигналов за счет эффекта акустоэлектрических преобразований («микрофонного эффекта») ТС ОИ путем подключения к их проводным линиям
$r_{53}^{(2)}$	Повышение разборчивости перехваченных информативных речевых (электрических) сигналов специальными программными методами
$r_{61}^{(2)}$	Измерение параметров информативных речевых сигналов путем высокочастотного облучения ТС и предметов интерьера ОИ
$r_{62}^{(2)}$	Измерение параметров информативных речевых сигналов путем высокочастотной прокачки (ВЧ-прокачки) в коммуникации ОИ
$r_{63}^{(2)}$	Измерение параметров электромагнитных излучений ТС ОИ на частотах их ВЧ-генераторов, модулированных информативным речевым сигналом
$r_{64}^{(2)}$	Повышение разборчивости перехваченных информативных речевых (электромагнитных) сигналов специальными программными методами
$r_{71}^{(2)}$	Преобразование данных, перехваченных по прямому акустическому, виброакустическому, акустоэлектрическому, акустооптическому и параметрическому техническим каналам утечки информации
$r_{72}^{(2)}$	Поиск разведываемой информации
$r_{73}^{(2)}$	Анализ достаточности разведывательной информации, перехваченной по техническим каналам утечки для раскрытия содержания разведываемой информации
$z_1^{(1)}$	Автоматизированное получение параметров тестовых акустических сигналов для оценки защищенности акустической речевой информации от утечки по прямому акустическому (воздушному) каналу
$z_2^{(1)}$	Автоматизированное получение параметров вибрационных сигналов, образованных тестовыми акустическими сигналами, для оценки защищенности акустической речевой информации от утечки по виброакустическому каналу

Окончание табл. 1

1	2
$z_3^{(1)}$	Автоматизированное получение параметров вибрационных сигналов, образованных тестовыми акустическими сигналами, для оценки защищенности акустической речевой информации от утечки по акустооптическому (лазерному) каналу
$z_4^{(1)}$	Автоматизированное получение параметров электрических сигналов, образованных за счет акустоэлектрических преобразований тестовых акустических сигналов, для оценки защищенности РИ по акустоэлектрическому каналу
$z_5^{(1)}$	Автоматизированное получение параметров электромагнитных сигналов, модулированных тестовыми акустическими сигналами, для оценки защищенности РИ от утечки по параметрическому каналу
$z_6^{(1)}$	Анализ защищенности РИ от утечки по прямому акустическому, виброакустическому, акустоэлектрическому, акустооптическому и параметрическому техническим каналам
$z_{11}^{(2)}$	Реализация методики настройки оборудования для измерения параметров акустических сигналов
$z_{12}^{(2)}$	Реализация методики измерения уровней тестовых акустических сигналов и шумов на ОИ
$z_{21}^{(2)}$	Реализация методики настройки соответствующего оборудования для измерения параметров вибрационных сигналов
$z_{22}^{(2)}$	Реализация методики измерения уровней вибрационных сигналов, образованных тестовыми акустическими сигналами и шумов на ограждающих конструкциях и инженерно-технических сооружениях ОИ
$z_{31}^{(2)}$	Реализация методики настройки соответствующего оборудования для измерения параметров вибрационных сигналов
$z_{32}^{(2)}$	Реализация методики измерения уровней тестовых вибрационных сигналов и шумов на окнах и иных отражающих поверхностях ОИ
$z_{41}^{(2)}$	Реализация методики настройки оборудования для измерения параметров электрических сигналов в проводных линиях ТС ОИ
$z_{42}^{(2)}$	Реализация методики определения параметров электрических сигналов в проводных линиях ТС ОИ при воздействии на них тестовых акустических сигналов и параметров шума в отсутствие воздействия
$z_{51}^{(2)}$	Реализация методики настройки соответствующего оборудования для измерения параметров электрических и электромагнитных сигналов
$z_{52}^{(2)}$	Реализация методики измерения уровней электрических сигналов в проводных линиях ТС и электромагнитного излучения ТС при воздействии тестовых акустических сигналов
$z_{61}^{(2)}$	Реализация методики расчета показателей защищенности РИ от утечки по прямому акустическому каналу
$z_{62}^{(2)}$	Реализация методики расчета показателей защищенности РИ от утечки по виброакустическому каналу
$z_{63}^{(2)}$	Реализация методики расчета показателей защищенности РИ от утечки по акустооптическому (лазерному) каналу
$z_{64}^{(2)}$	Реализация методики расчета показателей защищенности РИ от утечки по акустоэлектрическому каналу
$z_{65}^{(2)}$	Реализация методики расчета показателей защищенности РИ от утечки по параметрическому каналу

Заключение

В основу аналитического моделирования временных характеристик процессов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ и процессов контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ положена декомпозиционная структура функциональных моделей указанных процессов, отображающая их состав и структуру связей, а также свойство линейности и аддитивности математического ожидания композиции случайных величин.

Представленные аналитические модели служат научно обоснованным инструментом для получения значений времени реализации процессов перехвата РИ средствами АР-Р на ОИ и процессов контроля защищенности РИ от утечки по техническим каналам на ОИ, учет которых позволит повысить адекватность моделей показателей эффективности исследуемых процессов.

Список литературы

1. Зайцев А. П., Шелупанов А. А., Мещеряков Р. В. Технические средства и методы защиты информации : учебник для вузов. М. : Горячая линия – Телеком, 2016. 442 с.
2. Меньшаков Ю. К. Теоретические основы технических разведок : учеб. пособие / под ред. Ю. Н. Лаврухина. М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 536 с.
3. Торокин А. А. Инженерно-техническая защита информации : учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальностям в обл. информ. безопасности. М. : Гелиос АРВ, 2005. 960 с.
4. Скрыль С. В., Шелупанов А. А. [и др.]. Технические средства и методы защиты информации : учебник для студентов высших учебных заведений. М. : Машиностроение, 2008. 508 с.
5. Скрыль С. В. [и др.]. Функциональное моделирование как методология исследования конфиденциальности информационной деятельности // Интеллектуальные системы (INTELS' 2010) : тр. Девятого Междунар. симпозиума. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. С. 590–593.
6. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : ЮНИТИ, 2004. С. 148–151.
7. Джоган В. К. [и др.]. О математических аспектах расчета эффективности систем технической защиты информации // Вероятностные методы в дискретной математике : материалы Седьмой Международной Петрозаводской конференции. М. : Обозрение прикладной и промышленной математики. 2009. Т. 16, № 1. С. 70–71.

References

1. Zaytsev A.P., Shelupanov A.A., Meshcheryakov R.V. *Tekhnicheskie sredstva i metody zashchity informatsii: uchebnik dlya vuzov = Technical means and methods of information security: textbook for universities*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2016:442. (In Russ.)
2. Men'shakov Yu.K. *Teoreticheskie osnovy tekhnicheskikh razvedok: ucheb. posobie = Theoretical foundations of technical intelligence: textbook*. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2008:536. (In Russ.)
3. Torokin A.A. *Inzhenerno-tekhnicheskaya zashchita informatsii: ucheb. posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya po spetsial'nostyam v obl. inform. bezopasnosti = Engineering and technical protection of information: textbook for students studying in specialties in the regional information security*. Moscow: Gelios ARV, 2005:960. (In Russ.)

4. Skryl' S.V., Shelupanov A.A. [et al.]. *Tekhnicheskie sredstva i metody zashchity informatsii: uchebnyk dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy = Technical means and methods of information security: textbook for students of higher educational institutions*. Moscow: Mashinostroyeniye, 2008:508. (In Russ.)
5. Skryl' S.V. [et al.]. Functional modeling as a methodology for researching the confidentiality of information activities. *Intellektual'nye sistemy (INTELS' 2010): tr. Devyatogo Mezhdunar. simpoziuma = Intelligent systems (INTELS' 2010): proceedings of the 9th International symposium*. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2010:590–593. (In Russ.)
6. Kremer N.Sh. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika = Theory of probability and mathematical statistics*. Moscow: YuNITI, 2004:148–151. (In Russ.)
7. Dzhogan V.K. [et al.]. On the mathematical aspects of calculating the effectiveness of technical information protection systems. *Veroyatnostnye metody v diskretnoy matematike: materialy Sed'moy Mezhdunarodnoy Petrozavodskoy konferentsii = Probabilistic methods in discrete mathematics: proceedings of the 7th International Petrozavodsk conference*. Moscow: Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki. 2009;16(1): 70–71. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Александрович Маньков

адъюнкт, Краснодарское высшее
военное училище (Россия, г. Краснодар,
ул. Красина, 4)

E-mail: eMankov@inbox.ru

Evgeniy A. Man'kov

Postgraduate student,
Krasnodar Higher Military School
(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 14.12.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 31.01.2022

Принята к публикации / Accepted 15.02.2022

УДК 519.24; 53; 57.017
doi:10.21685/2072-3059-2022-1-5

Удвоение числа статистических критериев семейства Крамера – фон Мизеса дифференцированием малых выборок с нормальным и равномерным распределением биометрических данных

А. И. Иванов¹, А. Ю. Малыгин², С. А. Полковникова³

¹Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

^{2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ivan@pnici.penza.ru, ²mal890@yandex.ru, ³1996svetlanaserikova@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В прошлом веке создано четыре статистических критерия, которые можно объединить в семейство Крамера – фон Мизеса. Целью данной работы является удвоение числа критериев семейства рассматриваемых критериев. *Материалы и методы.* Предложено перед вычислениями выполнять численное дифференцирование данных малой выборки. При синтезе новых статистических критериев по схеме Крамера – фон Мизеса сравниваются производная входных данных с плотностью распределения нормальных данных. *Результаты и выводы.* Показано, что предложенные в работе новые статистические критерии имеют примерно в 10 раз меньшую вероятность ошибок первого и второго рода. Кроме того, они слабо коррелированы с классическими статистическими критериями этого же семейства.

Ключевые слова: статистический критерий Крамера – фон Мизеса, критерий Смирнова – Крамера – фон Мизеса, критерий Андерсона – Дарлинга, критерий Фроцини, искусственные нейроны, синтез новых статистических критериев

Для цитирования: Иванов А. И., Малыгин А. Ю., Полковникова С. А. Удвоение числа статистических критериев семейства Крамера – фон Мизеса дифференцированием малых выборок с нормальным и равномерным распределением биометрических данных // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 53–61. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-5

Doubling the number of statistical Cramer – von Mises criterion by differentiating small samples with normal and uniform distribution of biometric data

A.I. Ivanov¹, A.Yu. Malygin², S.A. Polkovnikova³

¹Penza Scientific Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

^{2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹ivan@pnici.penza.ru, ²mal890@yandex.ru, ³1996svetlanaserikova@gmail.com

Abstract. *Background.* In the last century, 4 statistical tests were created that can be combined into the Cramer – von Mises criterion. The purpose of this work is to double the number of this criteria, the criteria under consideration. *Materials and methods.* It is proposed to perform numerical differentiation of small sample data before calculations. In the synthesis of new statistical criteria according to the Cramer-von Mises scheme, the derivative of the input data is compared with the density of the distribution of normal data. *Re-*

sults and conclusions. It is shown that the new statistical criteria proposed in the work have about 10 times less probability of errors of the first and second kind. In addition, they are weakly correlated with the classical statistical criteria of the same family.

Keywords: Kramer – von Mises statistical criterion, Smirnov – Kramer – von Mises criterion, Anderson – Darling criterion, Frozini criterion, artificial neurons, synthesis of new statistical criteria

For citation: Ivanov A.I., Malygin A.Yu., Polkovnikova S.A. Doubling the number of statistical Cramer – von Mises criterion by differentiating small samples with normal and uniform distribution of biometric data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):53–61. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-5

Введение

Прошлый век начался со значимого события: в 1900 г. основателем математической статистики английским ученым Карлом Пирсоном был разработан и предложен критерий согласия хи-квадрат. Сегодня данный критерий является стандартным¹ и широко используемым наряду с другими классическими статистическими критериями². В целом математической общественностью в XX в. было разработано более 21 критерия для проверки гипотезы нормального распределения данных и порядка 24 статистических критериев для проверки гипотезы равномерного распределения данных [1]. К сожалению, большинство ранее разработанных статистических критериев было ориентировано на обработку больших выборок в 200 и более примеров.

В XXI в. активно развиваются нейросетевые технологии, более того, пришло понимание, что любой из известных статистических критериев может быть представлен как некоторый эквивалентный ему искусственный нейрон [2–4]. В этой ситуации удастся естественным образом объединять или совместно использовать несколько статистических критериев. Достаточно сформировать однослойную сеть из эквивалентных статистическим критериям нескольких искусственных нейронов.

Каждый из созданных в XX в. статистических критериев плохо работает на малых выборках. Например, на выборке в 16 опытов хи-квадрат критерий Пирсона дает значение появления вероятности ошибок первого и второго рода на уровне $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,33$, что примерно в 10 раз хуже, чем требует практика. Очевидно, что, объединив в одну нейросеть 20 эквивалентных статистическим критериям нейронов, на выходе мы будем получать выходной код с 20-кратной избыточностью. То есть мы всегда можем свернуть избыточный код, скорректировав в его разрядах ошибки [5, 6]. В простейшем случае может быть использован самокорректирующийся код, построенный на равноправном голосовании большинства состояний его разрядов.

Очевидно, что корректирующая способность кодов тем выше, чем больше его избыточность. В связи с этим желательно создавать новые статистические критерии, увеличивающие возможность коррекции ошибок при анализе малых выборок.

¹ Р 50.1.037–2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 .

² Р 50.1.037–2002. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии.

Семейство классических статистических критериев Крамера – фон Мизеса, ориентированных на проверку гипотезы нормального распределения малых выборок

Следует отметить, что критерий Крамера – фон Мизеса создан в 1928 г., однако он имеет достаточно скромную мощность на малых выборках. Так, для выборки в 16 опытов этот критерий позволяет различать нормальные и равномерные данные с вероятностями ошибок $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,4$. Это существенно хуже в сравнении с критерием хи-квадрат.

Добиться повышения мощности удалось Смирнову в 1936 г. Новая модификация критерия позволила снизить вероятности ошибок до значений $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,322$, что лучше, чем у критерия хи-квадрат.

Следующая модификация критерия была создана Андерсоном и Дарлинггом в 1952 г., она была получена делением накапливаемых данных на функции вероятности нормально распределенных данных. При этом удалось добиться снижения вероятностей ошибок первого и второго рода $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,272$. То есть такая модификация дает снижение вероятности ошибок на 21 %.

Последняя модификация критерия выполнена Фроцини в 1978 г. Фактически она сводится к замене в критерии Смирнова – Крамера – фон Мизеса операции возведения в квадрат на операцию вычисления модуля. Это позволило на выборках в 16 опытов снизить вероятности ошибок до значений $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,172$ – почти на 58 %.

Таким образом, модификации исходного статистического критерия Крамера – фон Мизеса за 50 лет исследований позволили значительно снизить вероятности ошибок первого и второго рода. Программное обеспечение на языке MathCAD для проведения численного эксперимента для нормальных данных приведено на рис. 1.

```

sx := | x ← sort(morm(16,0,1))
      | m ← mean(x)
      | σ ← stdev(x)
      | KfM ← ∑i=015 (pnorm(xi,m,σ) -  $\frac{i-0.5}{16}$ )2
      | SKfM ← ∑i=015 [ (pnorm(xi,m,σ) -  $\frac{i-0.5}{16}$ )2 · dnorm(xi,m,σ) ]
      | AD ← ∑i=015  $\frac{(pnorm(x_i,m,\sigma) - \frac{i-0.5}{16})^2 \cdot dnorm(x_i,m,\sigma)}{pnorm(x_i,m,\sigma) \cdot (1 - pnorm(x_i,m,\sigma))}$ 
      | F ← ∑i=015 [ | (pnorm(xi,m,σ) -  $\frac{i-0.5}{16}$ ) | · dnorm(xi,m,σ) ]
      | (KfM SKfM AD F)T

```

Рис. 1. Программное обеспечение на языке MathCAD для моделирования классических критериев семейства Крамера – фон Мизеса

Результаты численного моделирования четырех классических статистических критериев на малой выборке в 16 опытов приведены на рис. 2.

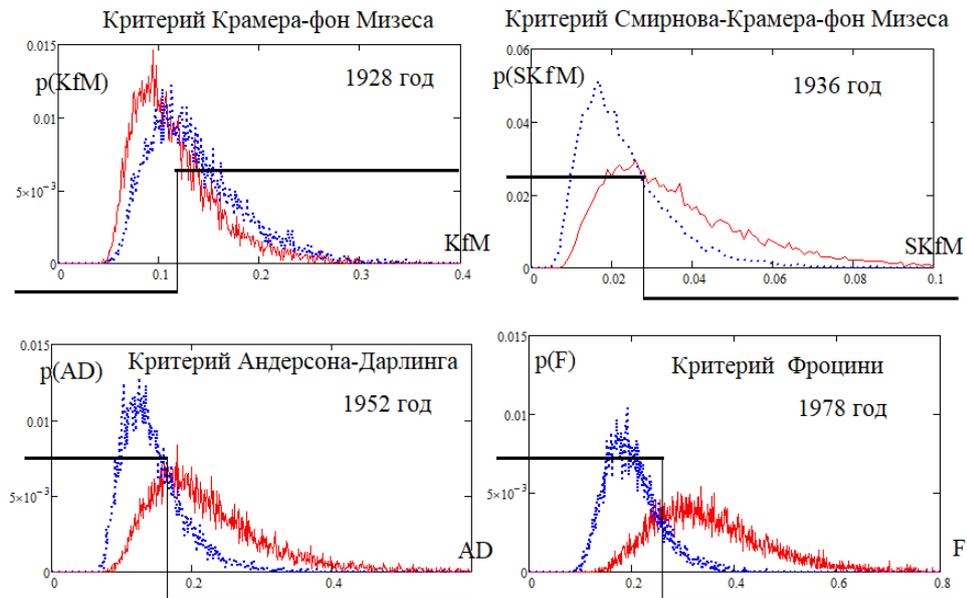


Рис. 2. Распределение данных четырех классических критериев (распределение откликов на равномерные данные отображено точками и дает состояние «0»)

Не случайно эволюция базового критерия Крамера – фон Мизеса шла по пути снижения вероятности ошибок первого и второго рода. Видимо, эволюция семейства рассматриваемых критериев далеко не закончена.

Синтез новых статистических критериев семейства Крамера – фон Мизеса через дифференцирование данных малой выборки

По программному коду (рис. 1) видно, что все критерии рассматриваемого семейства построены на разнице между скачками роста вероятности реальных отсчетов малой выборки и скачков вероятности идеального нормального распределения. Очевидно, что вместо интегральных вероятностей мы можем использовать их производную – плотность распределения вероятности [7]. Для этой цели нужно вычислить производную данных реальной выборки и соответствующую функцию плотности распределения вероятности. На рис. 3 приведен код соответствующего численного эксперимента для равномерно распределенных данных.

Результаты численного эксперимента по имитации четырех новых дифференциальных аналогов приведены на рис. 4.

Из данных рис. 4 видно, что дифференциальный вариант критерия Крамера – фон Мизеса дает снижение вероятности ошибок $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,041$. Этот показатель примерно в 10 раз лучше, чем у базового критерия.

Если попытаться воспроизводить дифференциальный аналог критерия Смирнова – Крамера – фон Мизеса, то мы получим снижение вероятности ошибок до величины $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,039$, или в 8,4 раза.

```

sx := x ← sort(runif(16, -3, 3))
m ← mean(x)
σ ← stdev(x)
dKfM ← ∑i=014 [ dnorm(xi, m, σ) -  $\frac{x_{i+1} - x_i}{16 \cdot (x_{15} - x_0)}$  ]2
dSKfM ← ∑i=014 [ [ dnorm(xi, m, σ) -  $\frac{x_{i+1} - x_i}{16 \cdot (x_{15} - x_0)}$  ]2 · dnorm(xi, m, σ) ]
dAD ← ∑i=014 [  $\frac{[ dnorm(xi, m, σ) - \frac{x_{i+1} - x_i}{16 \cdot (x_{15} - x_0)} ]^2 \cdot dnorm(xi, m, σ)}{pnorm(xi, m, σ) \cdot (1 - pnorm(xi, m, σ))}$  ]
dF ← ∑i=014 [ [ [ dnorm(xi, m, σ) -  $\frac{x_{i+1} - x_i}{16 \cdot (x_{15} - x_0)}$  ] ] · dnorm(xi, m, σ) ]
(dKfM dSKfM dAD dF)T
    
```

Рис. 3. Программное обеспечение на языке MathCAD для моделирования дифференциальных критериев семейства Крамера – фон Мизеса

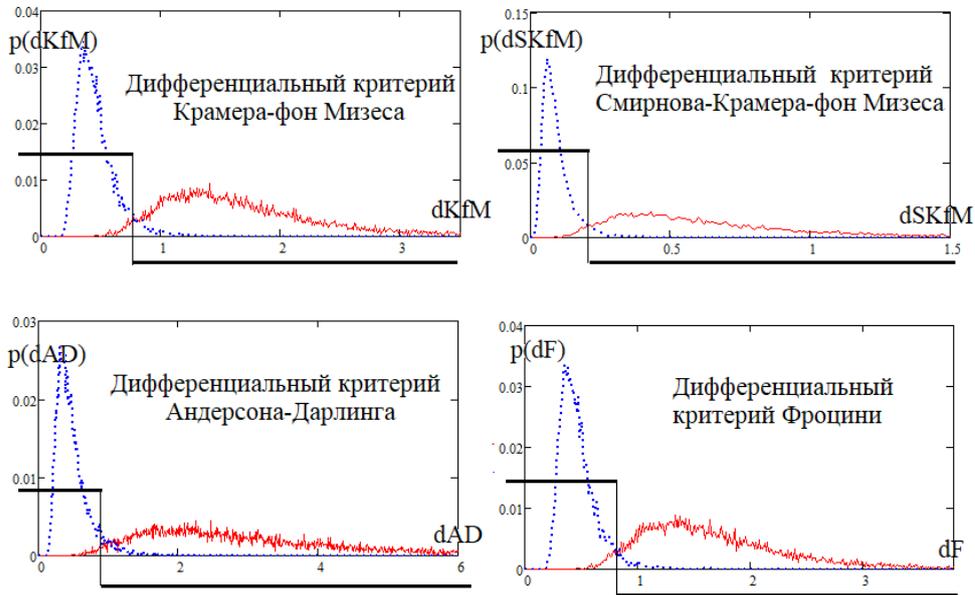


Рис. 4. Распределение данных четырех дифференциальных аналогов классических критериев Крамера – фон Мизеса

Дифференциальный аналог критерия Андерсона – Дарлингга обеспечивает вероятности ошибок $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,039$ или снижение по сравнению с его классическим аналогом в 6,4 раза.

Дифференциальный аналог классического критерия Фрочини дает тот же уровень вероятности ошибок, что и уже исследованные новые критерии $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,041$. Выигрыш по сравнению с его классическим аналогом – в 4,2 раза.

Корреляционные связи классических интегральных и новых дифференциальных статистических критериев

Одной из негативных особенностей классических статистических критериев является то, что их трудно обобщать [2], заменяя эквивалентными искусственными нейронами. Проблема состоит в сильной корреляционной сцепленности их откликов. Эта ситуация отображена на рис. 5.

	KfM	SKfM	AD	F
KfM	1	0.899	0.848	0.726
SKfM		1	0.949	0.93
AD			1	0.916
F				1

	dKfM	dSKfM	dAD	dF
dKfM	1	0.987	0.984	1
dSKfM		1	0.997	0.987
dAD			1	0.984
dF				1

$\text{mean}(0.899, 0.848, 0.726, 0.949, 0.93, 0.916) = 0.878$ $\text{mean}(0.987, 0.984, 1, 0.997, 0.987, 0.984) = 0.99$

Рис. 5. Демонстрация высокого уровня корреляционной сцепленности для семейства классических критериев и семейства их дифференциальных аналогов

Из данных рис. 5 видно, что классические критерии семейства Крамера – фон Мизеса имеют высокие значения коэффициентов взаимной корреляции. Аналогичная ситуация возникает и для группы дифференциальных аналогов этой группы критериев. Более того, уровень корреляционной сцепленности для дифференциальных критериев оказывается выше уровня корреляционной сцепленности классических статистических критериев.

Из данных на рис. 6 видно, что некоторые корреляционные связи между классическими и новыми статистическими оказываются достаточно низкими, это свидетельствует о взаимном дополнении классических критериев и их дифференциальных аналогов.

Заключение

Таким образом, переход от четырех классических статистических критериев Крамера – фон Мизеса к четырем их дифференциальным аналогам позволяет примерно в 10 раз снизить вероятности ошибок первого и второго рода. При этом далее усилить выигрыш нельзя, обобщая между собой только дифференциальные статистические критерии, из-за их сильной корреляционной сцепленности.

	KfM	SKfM	AD	F	dKfM	dSKfM	dAD	dF
KfM	1	0.899	0.848	0.726	-0.014	-0.012	-0.012	-0.015
SKfM		1	0.949	0.93	0.343	0.331	0.329	0.342
AD			1	0.916	0.462	0.448	0.456	0.462
F				1	0.589	0.569	0.568	0.588
dKfM					1	0.987	0.984	1
dSKfM						1	0.997	0.987
dAD							1	0.984
dF								1

Рис. 6. Данные коэффициентов взаимной корреляции между группой классических критериев и их дифференциальными аналогами

По всей видимости, перспективными будут являться комбинации классических критериев и их дифференциальных аналогов.

На данный момент нет технологий синтеза статистических критериев со значительными отличиями по вероятностям появления ошибок. В этом плане объединение классических статистических критериев и их дифференциальных аналогов является нетривиальной задачей.

Список литературы

1. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
2. Иванов А. И., Банных А. Г., Безяев А. В. Искусственные молекулы, собранные из искусственных нейронов, воспроизводящих работу классических статистических критериев // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2020. № 1 (48). С. 26–32.
3. Иванов А. И. Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке MathCAD) : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 36 с.
4. Иванов А. И., Банных А. Г., Куприянов Е. Н., Лукин В. С., Перфилов К. А., Савинов К. Н. Коллекция искусственных нейронов эквивалентных статистическим критериям для их совместного применения при проверке гипотезы нормальности малых выборок биометрических данных // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам I Всерос. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. С. 156–164.
5. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования : пер. с англ. М. : Техносфера, 2007. 320 с.
6. Безяев А. В. Биометрико-нейросетевая аутентификация: обнаружение и исправление ошибок в длинных кодах без накладных расходов на избыточность : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 40 с.
7. Иванов А. И., Малыгин А. Ю., Полковникова С. А. Новый статистический критерий большой мощности, полученный дифференцированием случайных данных

малой выборки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 67–74. doi:10.21685/2072-3059-2021-3-7

References

1. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: Fizmatlit, 2006:816. (In Russ.)
2. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Bezyaev A.V. Artificial molecules assembled from artificial neurons that reproduce the work of classical statistical criteria. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2020;(1):26–32. (In Russ.)
3. Ivanov A.I. *Iskusstvennye matematicheskie molekuly: povyshenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke MathCAD): preprint = Artificial mathematical molecules: improving the accuracy of statistical estimates on small samples (MathCAD programmes): preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:36. (In Russ.)
4. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Kupriyanov E.N., Lukin V.S., Perfilov K.A., Savinov K.N. Collection of artificial neurons equivalent to statistical criteria for their joint application of the hypothesis of normality of samples of biometric data. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam I Vseros. nauch.-tekhn. konf. = Information technology security: proceedings of the 1st All-Russian scientific and engineering conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2019:156–164. (In Russ.)
5. Morelos-Saragosa R. *Iskusstvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya: per. s angl. = The art of error-correcting coding: translated from English*. Moscow: Tekhnosfera, 2007:320. (In Russ.)
6. Bezyaev A.V. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: obnaruzhenie i ispravlenie oshibok v dlinnykh kodakh bez nakladnykh raskhodov na izbytochnost': preprint = Biometric-neural network authentication: error detection and correction in long codes without redundancy overhead: preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:40. (In Russ.)
7. Ivanov A.I., Malygin A.Yu., Polkovnikova S.A. A new statistical test of high power obtained by differentiating random data from a small sample. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;(3):67–74. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-3-7

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, доцент,
научный консультант, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of engineering sciences, associate
professor, scientific adviser, Penza
Scientific Research Electrotechnical
Institute (9 Sovetskaya street,
Penza, Russia)

Александр Юрьевич Малыгин

доктор технических наук, профессор,
начальник межотраслевой лаборатории
тестирования биометрических устройств
и технологий, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mal890@yandex.ru

Aleksandr Yu. Malygin

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the Intersectoral testing laboratory
of biometric devices and technologies,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Светлана Андреевна Полковникова
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

Svetlana A. Polkovnikova
Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

E-mail: 1996svetlanaserikova@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.01.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.02.2022

Принята к публикации / Accepted 21.02.2022

УДК 004.75 : 004.89
doi:10.21685/2072-3059-2022-1-6

Моделирование раскрашенных сетей Петри с использованием технологий семантического web

В. Ю. Каев¹, В. Н. Дубинин², А. В. Дубинин³, Л. П. Климкина⁴

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

⁴Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия

¹veld4n@gmail.com, ²dubinin.victor@gmail.com,

³dubinin.aleksey@gmail.com, ⁴ludmila.klimkina@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В связи с широким распространением концепции семантического web представляют интерес вопросы использования формальных моделей при проектировании параллельных, распределенных и мультиагентных систем на основе семантической паутины. Цель исследования – разработка методов и средств реализации высокоуровневых сетей Петри на основе онтологий, что может служить «мостом» к построению систем данного класса. *Материалы и методы.* Исследования выполнены с использованием онтологического подхода к моделированию сложных систем, технологий семантического web, языка SPARQL, а также положений теории высокоуровневых сетей Петри. *Результаты.* В процессе проведения исследования разработаны: онтология раскрашенных сетей Петри, описывающая как статические, так и динамические элементы сетевой модели; метод интерпретации раскрашенных сетей Петри на основе онтологий и языка SPARQL, позволяющий моделировать динамику сетевой модели как процесс изменения онтологии; комплекс программ OntoNet для распределенной интерпретации раскрашенных сетей Петри в среде семантического web; сетевая модель потоковой обработки событий, служащая демонстрационным примером для тестирования инструментальной системы. *Выводы.* Предложенные методы и средства онтологического моделирования и интерпретации раскрашенных сетей Петри могут быть использованы для быстрой разработки, прототипирования и реализации распределенных, параллельных и многоагентных систем обработки событий, данных и знаний в контексте семантического web.

Ключевые слова: раскрашенные сети Петри, моделирование, онтология, семантический web, SPARQL, инструментальные средства, OntoNet, распределенные системы, обработка данных и знаний

Для цитирования: Каев В. Ю., Дубинин В. Н., Дубинин А. В., Климкина Л. П. Моделирование раскрашенных сетей Петри с использованием технологий семантического web // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 62–77. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-6

Modeling of colored Petri nets using semantic Web technologies

V.Yu. Kaev¹, V.N. Dubinin², A.V. Dubinin³, L.P. Klimkina⁴

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

⁴Penza State Agricultural University, Penza, Russia

¹veld4n@gmail.com, ²dubinin.victor@gmail.com,

³dubinin.aleksey@gmail.com, ⁴ludmila.klimkina@gmail.com

Abstract. *Background.* In connection with the widespread use of the Semantic Web concept, the issues of using formal models in the design of parallel, distributed and multi-agent

© Каев В. Ю., Дубинин В. Н., Дубинин А. В., Климкина Л. П., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

systems based on the Semantic Web are of interest. The purpose of the work is to develop methods and tools for implementing high-level Petri nets based on ontologies, which can serve as a “bridge” to the building of systems of this class. *Materials and methods.* The research was carried out using an ontological approach to modeling complex systems, semantic Web technologies, the SPARQL language, as well as the provisions of the theory of high-level Petri nets. *Results.* In the course of the research, the following were developed: 1) an ontology of colored Petri nets, which describes both static and dynamic elements of the net model; 2) a method for interpreting colored Petri nets based on ontologies and the SPARQL language, which allows modeling the dynamics of the net model as a process of ontology change; 3) OntoNet software for distributed interpretation of colored Petri nets in the Semantic Web environment; 4) a net model of streaming event processing, which serves as a demonstration example for testing the tool. *Conclusions.* The proposed methods and tools for ontological modeling and interpretation of colored Petri nets can be used for rapid development, prototyping and implementation of distributed, parallel and multi-agent systems for processing events, data and knowledge in the context of the Semantic Web.

Keywords: colored Petri nets, modeling, ontology, semantic Web, SPARQL, software, OntoNet, distributed systems, data and knowledge processing

For citation: Kaev V.Yu., Dubinin V.N., Dubinin A.V., Klimkina L.P. Modeling of colored Petri nets using semantic Web technologies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):62–77. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-6

Введение

Использование формальных моделей является необходимым атрибутом в проектировании большинства систем в области информатики, автоматике и вычислительной техники. Формальные модели используются для спецификации, верификации, оценки производительности, рефакторинга, прототипирования и реализации программно-аппаратных систем, комплексов и сетей. В течение нескольких десятилетий популярным модельным формализмом являются высокоуровневые сети Петри и их подклассы, в числе которых раскрашенные сети Петри (РСП) [1]. С использованием РСП возможно моделирование дискретных систем с параллельными процессами и сложными межпроцессными взаимодействиями. Данный класс сетей Петри отличает наличие свойств, присущих высокоуровневому языку программирования, при сравнительно компактной форме параметризуемых моделей. К настоящему времени имеется множество реализаций высокоуровневых сетей Петри на различных платформах, в числе которых системы CPN Tools [1] (раскрашенные сети Петри) и Renew [2] (ссылочные сети).

В связи с широким распространением концепции семантического web [3] представляют интерес вопросы использования высокоуровневых сетей Петри при построении параллельных, распределенных и мультиагентных систем на основе семантической паутины, краеугольным камнем которой являются онтологии. Онтология есть явная спецификация концептуализации на уровне знаний [4]. Онтологическое моделирование в настоящее время является перспективным подходом к проектированию сложных систем [5]. Основным языком запросов в семантическом web, используемым для обработки онтологий, является язык SPARQL 1.1, одобренный консорциумом W3C [6].

Начало использованию онтологического представления сетей Петри (СП) было положено в работе [7]. В статье [8] предложена онтология сетей

Петри на основе языка OWL DL. Однако данная онтология представляет только статику сетевой модели. В работе [9] предложена онтология высокоуровневых СП на основе F-Logic, которая отражает в декларативном стиле как статическую структуру сетевой модели, так и динамику функционирования. Онтология реализована в системе FLORA-2, которая комбинирует логическое программирование и дедуктивные базы данных с парадигмой объектно-ориентированного программирования. На основе данной онтологии в статье [10] разработан «движок» OPENET для высокоуровневых сетей Петри. Инструментальная система имеет архитектуру «клиент-сервер», причем клиент использует RMI-интерфейс для доступа к системе OPENET. Данная система была успешно использована для реализации модулей обучения в методологии IMS LD [11]. Определенным недостатком системы OPENET является ее ориентация на онтологическое представление, которое не является мейнстримом в современном семантическом web, что может затруднить ее интеграцию с другими системами современного семантического web.

В данной работе предлагаются:

- 1) OWL DL-онтология раскрашенных сетей Петри, описывающая как статические, так и динамические элементы сетевой модели;
- 2) метод интерпретации раскрашенных сетей Петри на основе онтологий и языка SPARQL, позволяющий моделировать динамику сетевой модели как процесс изменения онтологии;
- 3) архитектура программных средств OntoNet для распределенной интерпретации раскрашенных сетей Петри в среде семантического web;
- 4) сетевая модель потоковой обработки событий, служащая демонстрационным примером для тестирования инструментальной системы.

Особенностями РСП, используемых в данной работе, являются: наличие позиций, представляющих RDF-хранилища данных, возможность использования нескольких однонаправленных дуг между двумя элементами сетевой модели; разметка переходов и дуг с помощью выражений; приоритетные переходы, а также использование концепции модулей для иерархической структуризации и распределенной интерпретации сетевой модели.

1. Онтология раскрашенных сетей Петри

Онтологическое представление РСП имеет следующие преимущества:

- 1) возможность «обогащения» синтаксического описания РСП семантической информацией;
- 2) возможность проведения семантического анализа описаний РСП;
- 3) упрощение процесса интеграции с другими онтологическими моделями и приложениями семантической сети;
- 4) возможность использования онтологии РСП как основы для прототипирования и реализации распределенных систем обработки и управления в семантическом web, включая многоагентные системы. Представление онтологии с использованием языков OWL/RDF позволяет использовать язык запросов SPARQL для выборки и модификации данных, что является необходимым условием для моделирования динамики функционирования РСП.

Онтология РСП включает следующие базовые классы: *CPN* (РСП), *Node* (Узел сети), *Arc* (Дуга), *Place* (Позиция), *Transition* (Переход), *Term*

(Выражение), *ColorSet* (Набор цветов), *Variable* (Переменная), *Function* (Функция), *Constant* (Константа), *Multiset* (Мультимножество), *BasisSet* (Базовый набор), *Data* (Значение), *Marking* (Маркировка), *MarkingOfPlace* (Маркировка позиции), *Evaluation* (Вычисление), *Firing* (Срабатывание), *TransitionMode* (Режим перехода), *Binding* (Сопоставление), *Port* (Порт).

Графическое представление ТВох-онтологии РСП приведено на рис. 1.

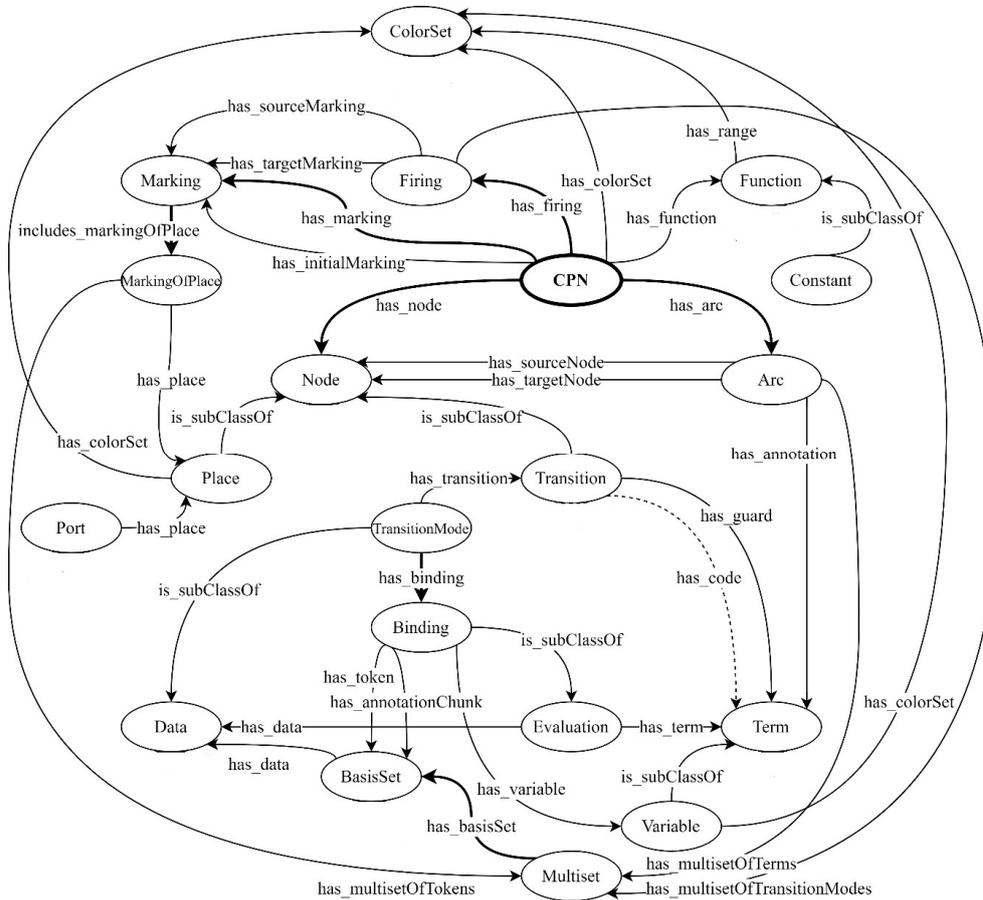


Рис. 1. Онтология РСП на уровне ТВох

На рис. 1 классы представлены в виде овалов, а объектные свойства – в виде дуг. Для классов онтологии с использованием дескриптивной логики [12] определены аксиомы классов. Предложенные аксиомы накладывают семантические ограничения на мощность и диапазон отношений, что позволяет проводить семантический анализ описаний.

Класс *CPN* описывает модуль раскрашенной сети Петри. Он определяется следующей аксиомой:

$$CPN \equiv \leq 1.has_initialMarking.Marking \Pi$$

$$\Pi \exists has_arc.Arc \Pi \exists has_colorSet.ColorSet \Pi$$

$$\Pi \exists has_firing.Firing \Pi \exists has_function.Function \Pi$$

$$\Pi \exists has_marking.Marking \Pi \exists has_node.Node .$$

Класс *Place* описывает позиции РСП. Он является подклассом *Node* и определяется аксиомой:

$$Place \equiv Node \Pi = 1.has_colorSet.ColorSet \Pi = 1.has_initialTokens.Term .$$

Класс *Transition* описывает переходы РСП. Он является подклассом *Node* и определяется аксиомой:

$$Transition \equiv Node \Pi \leq 1.has_code.Term \Pi = 1.has_guard.Term .$$

Класс *Arc* представляется следующей аксиомой:

$$Arc \equiv 1.has_annotation.Term \Pi \leq 1.has_multisetOfTerms.Multiset \Pi$$

$$\Pi = 1.has_sourceNode.Node \Pi = 1.has_targetNode.Node .$$

Класс *Firing* описывает срабатывание перехода в сети. Представление данного класса в виде аксиомы:

$$Firing \equiv 1.has_multisetOfTransitionModes.Multiset \Pi$$

$$\Pi = 1.has_sourceMarking.Marking \Pi = 1.has_targetMarking.Marking .$$

Класс *TransitionMode* описывает режим перехода. Он является подклассом *Data*, поскольку также является значением для базового набора и используется при формировании мультимножеств режимов перехода. Определяющая аксиома для данного класса:

$$TransitionMode \equiv Data \Pi = 1.has_transition.Transition \Pi$$

$$\Pi \exists has_binding.Binding .$$

Класс *Binding* описывает сопоставление переменных и их значений. Он является частным случаем и, как следствие, подклассом *Evaluation*. Его отличие заключается в наличии дополнительных отношений выборки базовых наборов. Данный класс определяется следующей аксиомой:

$$Binding \equiv Evaluation \Pi = 1.has_annotationChunk.BasisSet \Pi$$

$$\Pi = 1.has_token.BasisSet \Pi = 1.has_variable.Variable .$$

Класс *Port* описывает порт для межмодульного взаимодействия. Он определяется аксиомой:

$$Port \equiv 1.has_place.Place \Pi = 1.has_type.\{\langle In \rangle, \rangle Out \rangle\} \Pi$$

$$\Pi \leq 1.reserved_with.xsd : string \Pi \exists connected_to.xsd : string .$$

Создание онтологии (в формате *OWL*) осуществлялось в редакторе онтологий *Protégé* [13].

2. Моделирование динамики РСП с использованием SPARQL

В данной работе используется подход к представлению динамики функционирования системы как последовательности изменений онтологиче-

ской модели [14]. Процесс моделирования РСП представляет собой симуляцию срабатываний переходов посредством выполнения цепочек *SPARQL*-запросов (транзакций), в результате чего онтология *ABox* сетевой модели претерпевает изменения. Фрагменты и описание некоторых запросов, представляющих интерес, приводятся ниже. Стоит отметить, что повторяющиеся и незначительные части запросов заменены поясняющими комментариями в угоду краткости.

Первый запрос используется для инициализации системы. Он позволяет получить все статичные составляющие сети. По результатам данного запроса может выполняться конструирование начальной маркировки. Для этой цели используется конструирующий запрос:

```
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX t: <http://www.onto.net/core/>
PREFIX a: <http://www.onto.net/abox/heads-and-tails/>
WITH <http://localhost:3030/ontonet/data/abox>
INSERT {
  # добавление начальной маркировки, маркировок позиций и мультимножеств
  токенов}
WHERE {
  GRAPH <http://localhost:3030/ontonet/data/tbox> {
    ?cpn rdf:type t:CPN.}
  BIND(IRI(CONCAT(STR(a:), "marking_", STRUUID())) as ?initial_marking) {
    # привязка UUID позиции
    # формирование UUID маркировок позиций и мультимножеств токенов {
    # формирование базового набора токенов, количества вхождений и значений
    токенов}
    UNION { # аналогично для другого базового набора токенов... }
    BIND(IRI(CONCAT(STR(a:), "data_", STRUUID())) as ?data)
    BIND("{\"prop\": \"JSON-string\"} as ?data_value)
    UNION { # аналогично для другой позиции... }
```

В дальнейших фрагментах запросов префиксы для краткости будут опущены. Запрос для добавления в сеть всех возможных сопоставлений переменных и значений используется с целью последующей фильтрации этих значений. Это увеличивает гибкость системы, поскольку основной упор остается на формировании немногословных *SPARQL*-запросов.

Запрос для формирования потенциальных режимов перехода используется для агрегации сопоставлений с целью последующей фильтрации.

Запрос для исключения режимов перехода, для которых переход не разрешен, осуществляет фильтрацию режимов перехода по двум признакам:

- а) значения переменных должны быть непротиворечивы в рамках одного режима перехода;

- б) аннотации входных дуг должны быть способны извлечь зарезервированные токены из позиций, не допуская конфликтов:

```
DELETE {
  # удаление режима перехода}
WHERE {
  { SELECT DISTINCT ?transition_mode
    WHERE {
      { ?transition_mode rdf:type t:TransitionMode.
```

```

FILTER EXISTS {
  ?transition_mode rdf:type t:TransitionMode;
    t:has_binding ?binding1;
    t:has_binding ?binding2.
  FILTER (?binding1 != ?binding2)
  # проверка несовпадения значений одной переменной в режиме перехода
  FILTER (?value1 != ?value2)}}
UNION
{ # недостаточное количество токенов в позициях
  { SELECT ?transition_mode ((?n + SUM(?diff)) as ?res)
    WHERE {
      { SELECT DISTINCT ?transition_mode ?anno_chunk_bs ?token_bs
        WHERE { # выборка... }}
      ?anno_chunk_bs t:has_multiplicity ?anno_chunk_multiplicity.
      ?token_bs t:has_multiplicity ?token_multiplity.
      BIND (?anno_chunk_multiplicity as ?k)
      BIND (?token_multiplity as ?n)
      { SELECT DISTINCT ?anno_chunk_bs (SUM(?n) as ?sum_n)
        WHERE {
          { SELECT DISTINCT ?anno_chunk_bs ?token_bs
            WHERE { # выборка... }}
          ?token_bs t:has_multiplicity ?token_multiplity.
          BIND (?token_multiplity as ?n)}
          GROUP BY ?anno_chunk_bs}
      BIND ((?sum_n - ?n - ?k) as ?diff) # степень выборки токена базовыми наборами аннотации}
      GROUP BY ?transition_mode ?token_bs ?n}
      FILTER (?res < 0) # разница между количеством доступных и выбираемых токенов должна быть >= 0}}}
  { ?transition_mode t:has_binding ?binding. }
  UNION
  { ?transition_mode t:has_transition ?transition. }}

```

Дальнейшие действия движка начинаются с отправки запроса для получения данных о срабатывании:

```

SELECT ?type ?id ?variable_name ?value ?anno_chunk_bs ?token_bs
WHERE {
  # привязка UUID срабатывания
  ?firing t:has_multisetOfTransitionModes ?multiset.
  ?multiset t:has_basisSet ?basis_set.
  ?basis_set t:has_data ?transition_mode.
  {BIND ("multiplicity" as ?type)
  # выборка количества вхождений токенов и шаблонов}
  UNION
  {BIND ("relation" as ?type)
  # получение выборок токенов частями аннотации}
  UNION
  {BIND ("transition" as ?type)
  # получение UUID перехода}
  UNION
  {BIND ("binding" as ?type)
  # получение переменных и значений сопоставлений для режима перехода}}
ORDER BY ?type

```

Обработка срабатывания осуществляется движком по факту встраивания экземпляра срабатывания с некоторым режимом перехода. За извлечение данных о срабатывании аналогично отвечает отдельный запрос.

Запрос для получения комбинаций выборки токенов возвращает все возможные варианты извлечения токенов из входных позиций в данном режиме перехода. Его фрагмент:

```
SELECT <?переменные токенов...>
WHERE {
  BIND (<кол-во вхождений для частей аннотации> as <?переменная части аннотации>)
  # аналогично для других частей аннотации...
  { SELECT <?переменные токенов...> <?переменные частей аннотации...>
    WHERE {
      { VALUES <?переменная части аннотации для токена> { <значения от 0 до количества вхождений аннотации>}
        BIND ((<?переменные части аннотации для токена+...>) as <?переменная токена>)
        FILTER (<?переменная токена> <= <количество вхождений для токена>)}
      { # аналогично для других токенов... }
      BIND ((<?переменные части аннотации для токенов+...>) as <?переменная части аннотации>)
      # аналогично для других частей аннотации...}}}
```

Запрос для выполнения перехода состоит из трех частей. Две из них не столь значительны и осуществляют очистку онтологии от излишних триплетов. Третья часть определяет стабильные и новые маркировки позиций и базовые наборы токенов и осуществляет добавление новой маркировки, завершая таким образом срабатывание перехода. Запрос позволяет сохранять в новой маркировке сети отношения с нетронутыми маркировками позиций, а в новых маркировках позиций – с нетронутыми базовыми наборами токенов. Это позволяет упростить сравнение маркировок при обходе цепочки срабатываний:

```
INSERT {
  # добавление новой маркировки со стабильными и новыми маркировками позиций
  # добавление новых маркировок позиций и мультимножеств токенов}
WHERE {
  # формирование UUID новой маркировки
  # привязка UUID текущей маркировки
  { GRAPH <http://localhost:3030/ontonet/data/tbox> {?cpn rdf:type t:CPN.}}
UNION
  {?firing t:has_sourceMarking ?source_marking.
  {?source_marking t:includes_markingOfPlace ?marking_of_place.
  MINUS { # маркировки позиций с извлекаемыми из них токенами }
  MINUS { # маркировки позиций с добавляемыми в них токенами }
  BIND(?marking_of_place as ?stable_marking_of_place)}
  UNION
  {?source_marking t:includes_markingOfPlace ?marking_of_place.
  FILTER( EXISTS { # удаляемые токены }
  || EXISTS { # добавляемые токены } )
  # формирование UUID новой маркировки позиции и нового мультимножества токенов
```

```

?marking_of_place t:has_place ?place;
                t:has_multisetOfTokens ?multiset.
{?multiset t:has_basisSet ?token_bs.
MINUS {# удаляемые токены }
MINUS {# добавляемые токены }
BIND(?token_bs as ?stable_token_bs)}
UNION
{?multiset t:has_basisSet ?token_bs.
FILTER(EXISTS {# удаляемые токены } || EXISTS {# добавляемые токены })
# формирование UUID и значений для нового базового набора токенов
OPTIONAL {# удаляемые токены }
OPTIONAL {# добавляемые токены }
BIND ((?token_multiplicity - ?del_multiplicity + ?add_multiplicity) as ?multiplicity)
ty)
FILTER (?multiplicity > 0)}
UNION
{# для новых уникальных токенов
# формирование UUID и значений для нового базового набора токенов
MINUS {# проверка наличия аналогичных токенов }}}}}
DELETE {# удаление неиспользованных режимов перехода }
WHERE {# выборка свободных режимов перехода };
DELETE {# удаление неиспользованных сопоставлений }
WHERE {# выборка свободных сопоставлений }

```

3. Распределенная интерпретации РСП

Для организации распределенной интерпретации РСП могут использоваться следующие средства:

- 1) распределенное хранение данных (ресурсов);
- 2) распределенная обработка федеративных *SPARQL*-запросов;
- 3) распределение модулей РСП по узлам вычислительной сети.

Третий вариант выглядит наиболее предпочтительным, так как позволяет реализовывать микросервисы и дает возможность вести параллельную обработку модулей.

Существует два подхода к организации взаимосвязи модулей:

- 1) взаимодействие путем обмена сообщениями через интерфейсы модулей;
- 2) разделение общего ресурса (например, позиций сетевой модели).

Второй подход сложен в плане синхронизации, поэтому был использован только первый подход. При этом допускается связь «один ко многим» для модулей.

При срабатывании переходов и изменении позиций, являющихся выходными портами, обрабатывается следующий алгоритм синхронизации. На узле генерируется уникальная последовательность (хеш), с помощью которой резервируются локальные порты, используемые при переходе. Выполняется попытка занятия используемых портов на удаленных узлах. Хеш при этом используется для определения приоритета узла в случае одновременного выполнения переходов, затрагивающих контактные позиции. Если заняты удаленные порты, занимают локальные порты, после чего выполняется переход и порты освобождаются. Такой алгоритм особенно подходит для иерархических сетей, позволяя определить и выполнить приоритетный переход.

На рис. 2 предлагается структура интерпретатора модуля распределенной РСП названного OntoNet.



Рис. 2. Структура интерпретатора OntoNet

Данный интерпретатор включает следующие программные компоненты: движок, модуль расчета выражений, интерфейс командной строки, веб-сервер и связующее ядро. Система написана на *TypeScript* и предлагает возможность обработки разметки сети с помощью выражений на *JavaScript*.

Взаимодействие осуществляется через интерфейс командной строки, который позволяет конфигурировать систему путем подгрузки файлов *formulas.js* и *descriptor.js*, установить соединение со *SPARQL*-сервером по *URL*, загрузить *АВох*-онтологию сетевого модуля и наблюдать за процессом его работы.

В онтологии *АВох* модуля РСП описываются входные и выходные порты для организации межузловое взаимодействия. Порты инициализируются *URL* связанных узлов и типом (*input/output*). Онтология *ТВох* при этом может выноситься на отдельный сервер. Однако допускается и хранение собственных экземпляров *ТВох*-онтологии. В таком случае функциональные возможности благодаря обратной совместимости будут ограничены лишь используемой версией.

Срабатывания в распределенных РСП хранятся на каждом узле в отдельности и отражают действия в рамках их внутренних процессов, а также внешних воздействий связанных узлов. При этом общие выражения и константы могут выноситься в *ТВох*-онтологию в виде исключения, если это предпочтительно. Каждый модуль отвечает за срабатывание только своих переходов. При формировании меток в позиции, являющейся еще и выходным портом, модуль пересылает связанному узлу *SPARQL*-запрос на формирование, который аналогичен выполненному внутри самого модуля. Межмо-

дальнейшее взаимодействие сводится к передаче меток через порты. Решение о выполнении перехода принимается клиентской программой.

С помощью веб-сервера организуется взаимодействие с клиентскими приложениями и другими модулями в сети. Модуль расчета выражений используется для вычисления значений аннотаций дуг, сторожевых условий и формируемых токенов. Движок взаимодействует непосредственно с оконечной точкой доступа *SPARQL*. В нем реализована вся логика по инициализации модели и срабатыванию переходов, однако вычисление выражений делегируется модулю расчета.

Приложение спроектировано с использованием паттерна *Observer*, что позволяет уменьшить связность компонентов и в дальнейшем с легкостью расширять и улучшать систему, например, заменить интерфейс командной строки на полноценное приложение с графическим интерфейсом.

4. Пример. Сетевая модель потоковой обработки событий

В качестве иллюстративного примера предлагается модель потоковой обработки событий, когда каждое событие связано с данными. В системе имеется два независимых канала поступления информации: событийный канал, по которому поступают события, и канал данных, по которому поступают данные. Независимость этих двух видов каналов обуславливается логикой работы системы. Аналогом является разделение событий и данных в функциональных блоках (ФБ) стандарта IEC 61499 [15]. Взаимосвязь модулей сетевой модели показана на рис. 3.

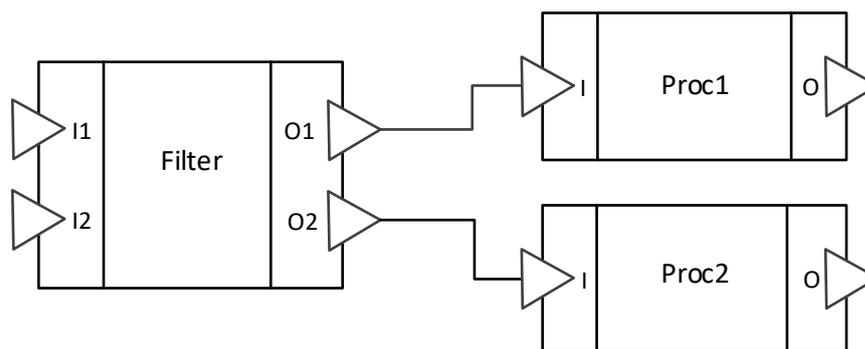


Рис. 3. Взаимосвязь модулей сетевой модели

Модуль *Filter* осуществляет фильтрацию поступающих из канала *I1* событий по связанным с ними данным, поступающим из канала *I2*. События разного класса направляются на выходы *O1* и *O2* соответственно. Модули *Proc1* и *Proc2* осуществляют обработку данных, связанных с входными событиями, определяют имя выходного события и значения результирующих данных, связанных с этим событием. Полученные данные подаются на выходы *O*.

Модуль *Filter* приведен на рис. 4. Следует отметить, что в иллюстративных целях на данном рисунке представлена маркировка позиций. Событийные токены через входной порт *I1* поступают в позицию *EVENT*. Формат событийных токенов следующий:

$$[\langle Id \text{ событийного входа} \rangle, \langle Id \text{ информационного входа} \rangle].$$

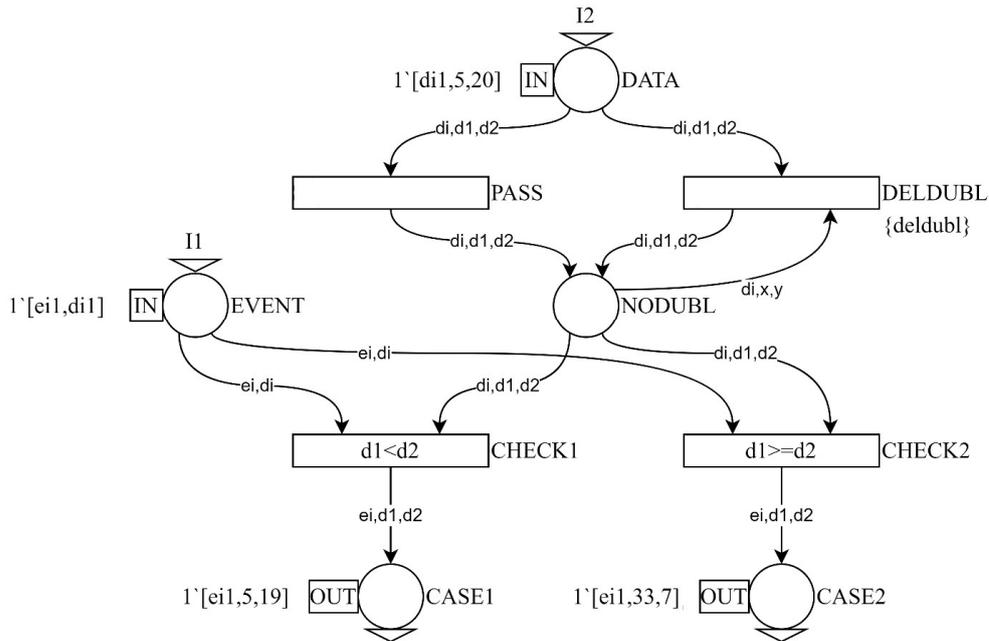


Рис. 4. Модуль *Filter*

Таким образом осуществляется динамическая привязка информационного входа к событийному.

Токены, представляющие данные, через входной порт I2 поступают в позицию DATA. Их формат следующий:

$$[\langle Id \text{ информационного входа} \rangle, \langle Данные1 \rangle, \langle Данные2 \rangle].$$

С помощью переходов DELDUBL и PASS организуется обновление данных, при котором в позицию NODUBL попадают только новые токены, перекрывая старые. Следует учесть, что приоритет перехода DELDUBL должен быть выше приоритета перехода PASS.

За сортировку событий отвечают переходы CHECK1 и CHECK2, которым назначены соответствующие сторожевые условия. В них также осуществляется привязка данных к выходным событиям. В результате в выходную позицию CASE1 попадают токены, для которых оказалось справедливым отношение:

$$Данные1 > Данные2.$$

В противном случае токены помещаются в позицию CASE2.

Модуль Proc1 приведен на рис. 5. Токен, содержащий идентификатор события и данные, поступает сначала в позицию INPUTS. В переходе PROCESSING производится обработка данных, которая заключается в определении суммы первого и второго значений данных. В позиции RESULT формируется новый токен, содержащий все тот же идентификатор события и результирующие данные.

Позиция RDF имеет особое значение. Она представляет собой RDF-хранилище данных о связях между событийными входами и выходами.

Структура данных представляет собой триплет следующего вида: $[ei, "conn", eo]$, где ei и eo – идентификаторы событийных входов и выходов; $conn$ – строковая константа. В сетевой модели может быть несколько подобных *RDF*-хранилищ. После нахождения соответствия «вход-выход» формируется токен, содержащий идентификатор событийного выхода и значение связанных с ним данных. Модуль *Proc2* в данной работе не рассматривается.

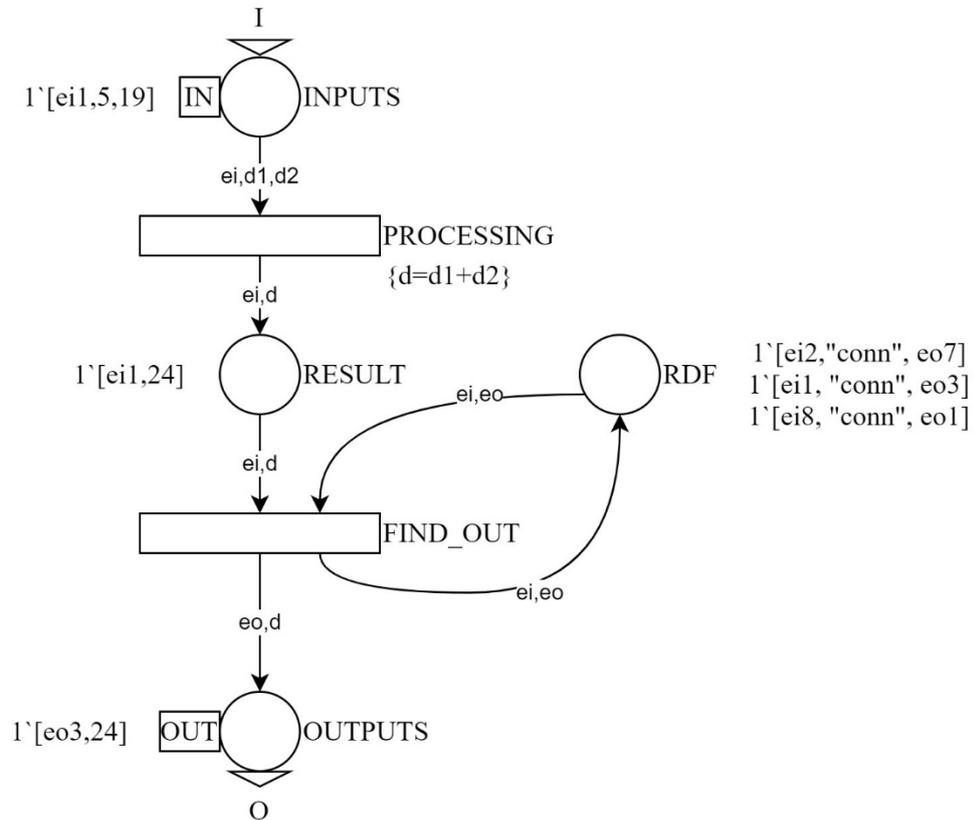


Рис. 5. Модуль *Proc1*

Структура системы распределенной обработки на основе вышеприведенной сетевой модели состоит из трех сетевых узлов, каждый из которых включает систему *OntoNet*, *SPQRQL*-сервер и онтологическое описание соответствующего модуля РСП. Следует отметить, что модули могут оперироваться не только в сетевом окружении, но и одним мультизадачным клиентским приложением.

Заключение

Предложенные методы и средства онтологического моделирования и интерпретации раскрашенных сетей Петри могут быть использованы для быстрой разработки, прототипирования и реализации распределенных, параллельных и многоагентных систем обработки событий, данных и знаний в контексте семантического web.

Направлением дальнейших исследований является более глубокая специализация раскрашенных сетей Петри под особенности семантического web, задание начальной маркировки сети в виде SPARQL-запроса, расширение моделирующих возможностей сетевой модели за счет структурной самоидентификации и использования онтологий и SPARQL-запросов в качестве значений (цветов) токенов, а также адаптация разработанных средств под конкретные приложения обработки событий, данных и знаний из практической сферы.

Список литературы

1. Jensen K., Kristensen L. M. *Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent System*. Springer-Verlag, 2009. 395 p.
2. Renew. The Reference Net Workshop. URL: <http://www.renew.de/> (дата обращения: 05.02.2022)
3. Szeredi P., Lukácsy G., Benkő T. *The Semantic Web Explained: The Technology and Mathematics behind Web 3.0*. Cambridge : Cambridge University Press, 2014. 478 p.
4. Gruber T. R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications // *Knowledge Acquisition*. 1993. № 5(2). P. 199–220. doi:10.1006/knac.1993.1008.
5. Keet C. M. *An Introduction to Ontology Engineering*. College Publications, 2018. 344 p.
6. DuCharme B. *Learning SPARQL: Querying and Updating with SPARQL 1.1*. O'Reilly, 2013. 386 p.
7. Gašević D., Devedžić V. Interoperable Petri Net Models via Ontology // *International Journal of Web Engineering and Technology*. 2007. Vol. 3, iss. 4. P. 374–396. doi:10.1504/IJWET.2007.014439.
8. Zhang F., Ma Z. M., Ribarić S. Representation of Petri Net with OWL DL Ontology // *Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*. IEEE Publisher, 2011. P. 1452–1456.
9. Vidal J. C., Lama M., Bugarín A. A High-level Petri Net Ontology Compatible with PNML // *Petri Net Newsletter*. 2006. Vol. 71. P. 11–23.
10. Vidal J. C., Lama M., Bugarín A. OPENET: Ontology-based engine for high-level Petri nets // *Expert Systems with Applications*. 2010. Vol. 37, iss. 9. P. 6493–6509. doi:10.1016/j.eswa.2010.02.136.
11. Vidal J. C., Lama M., Sanchez E., Bugarín A., Novegil A. OPENET LD: An Ontology-based Petri Net Engine to Execute IMS LD Units of Learning // *9th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*. IEEE Publisher, 2009. P. 499–503.
12. McGuinness D. L., Nardi D., Patel-Schneider P. F. *The description logic handbook: Theory, implementation, and applications*. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 578 p.
13. Protégé. A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. URL: <https://protege.stanford.edu/> (дата обращения: 05.02.2022).
14. Дубинин В. Н., Дубинин А. В., Янг Ч.-В., Вяткин В. В. Использование языка SPARQL в онтологическом моделировании мультиагентных систем в семантическом Web // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2020. № 1. С. 4–18.
15. Vyatkin V. IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems Design. ISA, 2015. 261 p.

References

1. Jensen K., Kristensen L.M. *Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent System*. Springer-Verlag, 2009:395.

2. *Renew. The Reference Net Workshop*. Available at: <http://www.renew.de/> (accessed 05.02.2022)
3. Szeredi P., Lukácsy G., Benkő T. *The Semantic Web Explained: The Technology and Mathematics behind Web 3.0*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014:478.
4. Gruber T.R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993;(5):199–220. doi:10.1006/knac.1993.1008.
5. Keet C.M. *An Introduction to Ontology Engineering*. College Publications, 2018:344.
6. DuCharme B. *Learning SPARQL: Querying and Updating with SPARQL 1.1*. O'Reilly, 2013:386.
7. Gašević D., Devedžić V. Interoperable Petri Net Models via Ontology. *International Journal of Web Engineering and Technology*. 2007;3(4):374–396. doi:10.1504/IJWET.2007.014439
8. Zhang F., Ma Z.M., Ribarić S. Representation of Petri Net with OWL DL Ontology. *Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*. IEEE Publisher, 2011:1452–1456.
9. Vidal J.C., Lama M., Bugarín A. A High-level Petri Net Ontology Compatible with PNML. *Petri Net Newsletter*. 2006;71:11–23.
10. Vidal J.C., Lama M., Bugarín A. OPENET: Ontology-based engine for high-level Petri nets. *Expert Systems with Applications*. 2010;37(9):6493–6509. doi:10.1016/j.eswa.2010.02.136.
11. Vidal J.C., Lama M., Sanchez E., Bugarín A., Novegil A. OPENET LD: An Ontology-based Petri Net Engine to Execute IMS LD Units of Learning. *9th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*. IEEE Publisher, 2009:499–503.
12. McGuinness D.L., Nardi D., Patel-Schneider P.F. *The description logic handbook: Theory, implementation, and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010:578.
13. Protégé. *A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems*. Available at: <https://protege.stanford.edu/> (accessed 05.02.2022).
14. Dubinin V.N., Dubinin A.V., Yang Ch.-V., Vyatkin V.V. Using the SPARQL language in ontological modeling of multi-agent systems in the Semantic Web. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2020;(1):4–18. (In Russ.)
15. Vyatkin V. *IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems Design*. ISA, 2015:261.

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Юрьевич Каев

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: veld4n@gmail.com

Vladislav Yu. Kaev

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Виктор Николаевич Дубинин

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dubinin.victor@gmail.com

Viktor N. Dubinin

Doctor of engineering sciences, associate professor, professor of the sub-department of computer engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Викторович Дубинин

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: dubinin.aleksey@gmail.com

Aleksey V. Dubinin

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Людмила Петровна Климкина

старший преподаватель кафедры
финансов и информатизации бизнеса,
Пензенский государственный аграрный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Ботаническая, 30)

E-mail: ludmila.klimkina@gmail.com

Lyudmila P. Klimkina

Senior lecturer of the sub-department
of finance and business informatization,
Penza State Agricultural University
(30 Botanicheskaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.01.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 06.02.2022

Принята к публикации / Accepted 28.02.2022

УДК 004.514

doi:10.21685/2072-3059-2022-1-7

Исследование современных подходов к проектированию цифровых интерфейсов

И. П. Бурукина¹, А. Э. Привалов²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹burukinairina@gmail.com, ²AndreW130701@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Постоянное усложнение задач взаимодействия между пользователем и системой требует новых подходов к проектированию пользовательских интерфейсов, которые позволили бы улучшить функционал на уже действующих интерфейсах и создавать новый тип цифровых интерфейсов. Объектом исследования являются современные цифровые интерфейсы, характеризующиеся когнитивной нагрузкой, широкой возможностью экспериментов и легкостью изменений, а также наличием продвинутой аналитики, которая позволяет искать слабые места и постоянно улучшать информационный продукт. Предметом исследования являются принципы построения современных цифровых интерфейсов, ведущие к снижению трудоемкости проектирования пользовательского интерфейса с поддержкой различных типов диалога. Цель исследования – унифицировать основные концепции проектирования и реализации цифровых пользовательских интерфейсов с поддержкой нескольких типов диалога. *Материалы и методы.* Проводимые в работе теоретические исследования базируются на изучении литературы, собственном опыте и опыте практикующих программистов. *Результаты.* Проанализирована работа цифровых интерфейсов с точки зрения функциональности и требований коммуникации. Предложена концепция по выбору способов коммуникации для определенных групп целевой аудитории и варианты достижения минимальной когнитивной нагрузки. Даны рекомендации для решения основных информационных задач в цифровых интерфейсах: построение иерархии элементов, расстановка акцентов, идентификация объектов. *Выводы.* На основании выявленных и собранных в единый материал определений, требований и принципов разработки предложен ряд рекомендаций для проектирования цифровых интерфейсов. Это позволит строить решения для конкретного интерфейса с высокой скоростью работы пользователей и низким количеством человеческих ошибок, независимо от конкретных задач, под которые проектируется система.

Ключевые слова: интерфейс, проектирование, функциональность, коммуникация, когнитивная нагрузка, индикация, целевая аудитория, закона Миллера

Для цитирования: Бурукина И. П., Привалов А. Э. Исследование современных подходов к проектированию цифровых интерфейсов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 78–87. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-7

Contemporary approaches to digital interface design

I.P. Burukina¹, A.E. Privalov²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

¹burukinairina@gmail.com, ²AndreW130701@gmail.com

Abstract. *Background.* The increasing complexity of tasks related to users' interaction with the system requires us to develop novel approaches to user interface design that would improve functionality of the existing interfaces and allow us to create new ones. The present paper focuses on digital interfaces with the following characteristics: cognitive load, room for experimentation, changeability, and advanced analytics that makes it possible to identify and eliminate the system's weak points. The research considers the main principles of digital interface design that facilitate building a user interface that supports various types of dialogue, and our main goal is to unify various approaches to designing and constructing such systems. *Materials and methods.* Having examined digital interfaces in terms of their functionality and communication requirements, we propose a novel approach to choosing between different ways of communication based on the characteristics and demands of the target audience. *Results.* Crucially, we offer new techniques for minimizing the cognitive load of a user interface. We further suggest solutions for the main information tasks related to user interfaces, such as building a visual hierarchy, placing emphasis, and identifying objects. *Conclusions.* Having identified and gathered the definitions, requirements and principles of interface design, we outline new ways to increase the speed of users' performance and reduce human error, regardless of the particular tasks and purpose of the system.

Keywords: interface, design, functionality, communication, cognitive load, indication, target audience, Miller's law

For citation: Burukina I.P., Privalov A.E. Contemporary approaches to digital interface design. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):78–87. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-7

Введение

Пользовательский интерфейс – связующий элемент, который обеспечивает взаимодействие между пользователем и системой. Это понятие охватывает все области деятельности, в которых человек воздействует на систему: от дверной ручки до органов управления космической техники. Проектирование любого интерфейса основывается на одних и тех же правилах, требованиях и задачах, обусловленных природой человека. Однако пользователи могут предъявлять разные требования к интерфейсам, которые определяются как личными предпочтениями, так и профессиональным назначением, особенностями работы в различных предметных областях. Много исследований проведено по данному вопросу [1–3]. Изданы учебники с хорошими примерами, в которых подробно рассмотрены ключевые принципы и правила проектирования интерфейса, совместимость процессов [4–6]. Однако стремительное развитие цифровых технологий приводит к новым вопросам, связанным с проектированием цифровых интерфейсов. Интересны подходы к проектированию интерфейсов с точки зрения инженерной психологии [7–9]. Особое внимание уделяется проектированию интерфейсов для людей с ограниченными возможностями здоровья [10]. Многие разработчики проектируют интерфейсы для международного использования и поэтому изучают лингвистические вопросы, связанные с поддержкой многоязычных компонентов пользовательского интерфейса [11, 12].

Все эти исследования настолько объемны и разноплановы, что объединить их в одну публикацию невозможно. Целью данной статьи является выделение основных принципов построения современных цифровых интерфейсов для снижения трудоемкости проектирования пользовательского интер-

фейса с поддержкой различных типов диалога. Мы собрали сведения по вопросам разработки интерфейсов, основанные на собственном опыте и опыте практикующих программистов. Данный материал в первую очередь может быть полезен начинающим frontend-разработчикам.

Особенности цифровых интерфейсов

Главные особенности цифровых интерфейсов:

- только когнитивная нагрузка;
- возможность экспериментов и легкость изменений;
- продвинутая аналитика;
- быстрое развитие.

Чтобы работать с цифровым интерфейсом, достаточно уметь пользоваться клавиатурой и мышью. Поэтому решение задачи полностью ложится на способности и навыки пользователя.

Для разработки цифрового интерфейса не требуется ресурсов, кроме времени проектировщика. Это позволяет относительно дешево экспериментировать и проверять гипотезы. Изменения вносятся редактированием нескольких строк кода. Также в цифровые интерфейсы легко встроить систему аналитики, которая позволяет искать слабые места и постоянно улучшать продукт.

Из-за относительной молодости проектирование цифровых интерфейсов еще формируется как дисциплина. Также активно развиваются технологии, и люди подстраиваются под них. Проектировщики вынуждены постоянно следить за новыми стандартами и достижениями других разработчиков. Эти факторы сильно выделяют процесс проектирования цифровых интерфейсов среди систем других типов.

Концепция проектирования цифровых интерфейсов

Так как интерфейс представляет собой прослойку между системой и пользователем, его работа состоит из двух частей: функциональность и коммуникация.

Функциональность – способность интерфейса влиять на систему. Функциональность обеспечивает выполнение задачи. Функциональность делится на два уровня: интерфейсный и внутрисистемный. Интерфейсный уровень отвечает за наличие необходимых для решения задачи элементов управления. Внутрисистемный – за связь элементов управления и процессов внутри системы. Для регистрации на сайте необходимы поля формы и кнопка отправки (интерфейсный уровень). При нажатии на кнопку данные должны корректно отправиться и обработаться (внутрисистемный уровень). Для обеспечения функциональности в цифровых системах разработчик выбирает и реализовывает сочетание конкретных инструментов и методов.

Коммуникация – взаимодействие с пользователем. Интерфейс отвечает на действия человека, отображая изменения в системе. Также интерфейс сообщает о принципах работы с ним. Это сообщение передается с помощью явной инструкции или через свойства элементов управления (вид ручки указывает на то, что нужно за нее потянуть). Качество взаимодействия человека с интерфейсом определяется эффективностью коммуникации.

Оценивая качество интерфейса, проектировщики в первую очередь опираются на время решения задачи пользователем, порог вхождения, время освоения и когнитивную нагрузку.

Выбор способов коммуникации зависит от особенностей человека. Поэтому проектировать интерфейс лучше после изучения целевой группы пользователей. В первую очередь необходимо узнать о предыдущем опыте работы с интерфейсами, культурном контексте пользователя и контексте решения задачи. Предыдущий опыт формирует навыки, привычки и ожидания, которые определяют восприятие и скорость освоения нового интерфейса. Незнакомый интерфейс затрудняет работу пользователей и повышает шанс ошибок. Иногда этот эффект распространяется даже на случаи с очевидным улучшением продукта. Однако со временем пользователи привыкают к новому и эффективность повышается. Задача проектировщика интерфейсов – найти баланс между новаторством и старыми привычками. В идеальном случае новый интерфейс проектируется с учетом старых принципов взаимодействия. Пользователи не должны переучиваться, проходить дополнительные курсы или читать инструкции. Нововведения должны быть итеративными. Но на практике не всегда хватает ресурсов для такого подхода.

Зачастую приходится проектировать интерфейсы для больших групп пользователей. Например, сервис работы с документами для юристов. В такой ситуации невозможно изучить привычки конкретного пользователя, узнать, какими инструментами он пользовался раньше. Тогда приходится анализировать другие сервисы, популярные среди этой группы пользователей.

Культурный контекст – также набор привычек, но уже не на уровне конкретного пользователя, а глобально. Для цифровых систем важной культурной особенностью является традиция письма, поскольку текст лежит в основе экранных интерфейсов. Также культура влияет на восприятие цвета и образов. Глобальные привычки влияют на формирование индивидуальных.

Проектировщик должен учитывать, в каком контексте пользователь взаимодействует с интерфейсом: сколько у него времени на задачу, какое устройство использует, зачем обращается к системе и т.д. Эти факторы определяют, каким будет интерфейс. Например, мобильные приложения, которые используют на ходу, имеют крупные элементы управления и альтернативные методы ввода информации.

Даже неопытные пользователи должны использовать интерфейс без инструкций. Для этого необходимо наладить коммуникацию с человеком внутри интерфейса. Правильные акценты и подписи к элементам управления позволяют пользователю понять алгоритм решения его задачи. Так принципы работы будут понятны каждому изначально.

Также интерфейс станет лучше, если опытные пользователи получат возможность работать быстрее. Для этого добавляют дополнительные возможности: горячие клавиши, жесты, расширения и др. Иными словами, каждый пользователь должен решать типовые задачи без ошибок, а с приобретением опыта решение должно стать быстрее и комфортнее.

После изучения пользователей дизайнер проектирует коммуникацию. Чтобы выполнить эту задачу правильно, необходимо придерживаться набора принципов и ценностей.

Работу человека с интерфейсом легко представить в виде диалога: пользователь воздействует на систему и получает в ответ информацию о ре-

зультате действий. В рассматриваемой модели первое сообщение исходит от системы. Человек узнает начальное состояние и варианты взаимодействия. Задача проектировщика состоит в том, чтобы продумать удачные сообщения. При этом стоит избегать текста. Профессиональные проектировщики реализуют коммуникацию с помощью свойств элементов управления. Например, благодаря правильной форме и без надписей понятно, что на выключатель нужно нажать. Обусловлено это правилом тем, что текст пользователь воспринимает гораздо медленнее и не так охотно.

Особо важно спроектировать сообщение о начальном состоянии системы и возможных действиях. Без этой информации пользователь не поймет, как решать задачу, и дальнейшего взаимодействия не произойдет. Человек должен сразу понять назначение интерфейса. Результат любого действия должен быть очевиден.

В некоторых сложных системах настолько много функций, что проектировщики прибегают к разделению на режимы – состояния интерфейса, в которых одни и те же действия приводят к разному результату. Так реализовано переключение раскладки на клавиатуре. Это решение считается слабым. Пользователю приходится постоянно следить за выбранным режимом. Механика временного переключения режима, требующего поддержания, избавляет от этого недостатка. По такому принципу работает переключение регистра через клавишу shift. Следует избегать режимов в цифровых интерфейсах.

Путь решения задачи делят на шаги. Такой алгоритм называется сценарием. Существуют сценарии разной степени полноты и детализации. Они могут описывать как части интерфейса, которые пользователь задействует для решения задачи, так и конкретные действия, которые необходимо совершить.

На каждом этапе сценария пользователь должен продвигаться дальше с минимальной когнитивной нагрузкой. Для этого необходимо избавиться от тупиков в сценарии и сделать следующий шаг очевидным.

Индикация – совокупность сигналов, которая отражает состояние системы. С помощью нее пользователь видит результат действия. В цифровых интерфейсах индикация выражается через цвет, форму, анимацию или текст. Основные типы индикации: текущего состояния и прогресса, успешного выполнения задачи, функционирования системы, ошибок.

Индикация текущего состояния и прогресса отражает текущий этап сценария и сколько шагов осталось до решения задачи. В цифровых интерфейсах для отображения текущего шага достаточно разработать систему заголовков. А для выражения прогресса используют прогресс-бары. Чем сложнее сценарий, тем полезнее этот тип индикации.

Индикация успешного выполнения задачи сообщает пользователю о достижении цели. Человек понимает, что все сделал правильно и никаких действий больше совершать не нужно. В цифровых интерфейсах в качестве такой индикации выступают текстовое сообщение, иконка или микроанимация.

Индикация функционирования системы показывает, что продукт работает корректно. Данная индикация полезна, когда пользователь вынужден ждать. Например, когда загружается страница или программа выполняет вычисления. Анимация отлично подходит для этого типа индикации: прелоадеры, прогресс-бары. Если ожидания занимают меньше 2–3 с, индикация функ-

ционирования не нужна; до 5–6 с – достаточно прелоадера без дополнительной индикации. Для более продолжительного ожидания лучше подойдет прогресс-бар и (или) процентный счетчик.

Современные технологии позволяют реализовать прелоадер на основе прототипа, который демонстрирует структуру загружаемой страницы. Так пользователь ориентируется в интерфейсе до полной загрузки.

Отдельно рассмотрим дополнительную индикацию на основе микроанимаций. В ответ на действия пользователя запускается анимация, которая характеризует результат действия. Приставка «микро» означает, что анимация воспроизводится внутри элемента управления, с которым взаимодействует человек. Также этот тип анимации непродолжителен: длится менее 1–2 с. Например, при попытке отправить незаполненную форму кнопка колеблется, подчеркивая ошибку. Не все пользователи смогут правильно интерпретировать анимацию. Однако в сочетании с другими методами индикации взаимодействие ускоряется. Похожий принцип лежит в основе менее популярного метода звуковых ответов на действия.

В некоторых системах каждая ошибка критична. Идеальный интерфейс не позволяет пользователю ошибиться в принципе. Например, в поле ввода номера телефона данные автоматически представляются в нужном формате, а нецифровые символы не вводятся. В сложных системах нельзя полностью исключить ошибки. Когда не получается сделать ошибку невозможной, проектировщик должен усложнять ошибочные действия.

Правильно спроектированные ограничители гораздо эффективнее инструкций, которые читают не все пользователи. Если внимание будет сфокусировано на правильных действиях, а неправильные будут скрыты или исключены, пользователю станет очевиден путь решения задачи.

Если пользователь все же ошибся, необходимо сразу сообщить о том, что случилось и как решить проблему. Лучше использовать текстовые сообщения длиной в 1–3 коротких предложения. Целевой пользователь должен быстро понять сообщение. Для этого лучше избегать технических терминов, метафор и сложных оборотов. В качестве дополнительной индикации используется красный цвет. Когда проблема решается простым действием, сообщение дополняется элементами управления. Например, кнопка или ссылка, направляющая в нужный раздел настроек или автоматически изменяющая нужные параметры.

Пользователи периодически совершают действия, которые необратимо влияют на систему. Например, удаляют файл. Из-за невнимательности люди теряют ценные документы. Для защиты от необдуманных действий проектировщики используют всплывающие окна с дополнительным подтверждением. Однако избыток всплывающих окон в современных интерфейсах снизил внимание пользователей к таким сообщениям. Зачастую люди даже не читают текст и скорее закрывают окно. Правильнее будет позволить пользователю ошибаться и дать возможность отменить нежелательные действия. Поэтому еще в 1982 году разработчики добавили в операционные системы «корзину». Также в офисных программах отменяются последние действия. Частным случаем такого подхода будет резервное копирование или контроль версий.

Чем проще задача, тем быстрее ее выполнить и сложнее ошибиться. В цифровых интерфейсах сложность задачи сводится к умственным усилиям, необходимым для решения. В процессе работы с интерфейсом пользователь

решает, в какой раздел перейти, какие данные ввести, куда нажать, а куда не стоит. Интерфейс считается качественным, если такие решения принимаются мгновенно. Снижение когнитивной нагрузки ускоряет принятие решения.

В проектировании интерфейсов встречается ложная интерпретация закона Миллера: «кратковременная человеческая память, как правило, не может запомнить и повторить более 7 ± 2 элементов» [6, 9]. Некоторые проектировщики считают, что на экране не должно быть более 7 однотипных элементов, поэтому, например, сокращают количество пунктов меню. Однако из закона такой подход не следует. Пользователю не нужно запоминать элементы на экране. Он всегда может обратиться к необходимой информации. Если человеку не нужно держать информацию в голове, когнитивная нагрузка снижается. Но все же с увеличением объема информации человеку сложнее ориентироваться. Эта проблема решается структурированием. Не стоит жертвовать количеством элементов на основании закона Миллера. В определенных случаях дополнительная информация даже улучшит ситуацию.

Оценить когнитивную нагрузку помогает критерий информативности – отношение объема релевантной информации к общему объему. Этот критерий применяется как к тексту, так и к визуальной информации. Любое слово, символ или графический элемент должны помогать пользователю решить задачу.

Обратим внимание на основные информационные задачи в цифровых интерфейсах: построение иерархии элементов, расстановка акцентов, идентификация объектов.

Построение иерархии и расстановка акцентов необходимы для обозначения отношений объектов. Иерархия подразумевает разделение на родительские и дочерние элементы, а расстановка акцентов – на приоритетные и второстепенные. Эти отношения помогают пользователю быстрее найти нужный элемент на странице.

Идентификация объектов позволяет пользователю определять, к какой категории относится рассматриваемый элемент. Для этого категории должны отличаться визуально.

Категории делятся на стандартные и пользовательские. В стандартных категориях содержатся элементы, которые используют в каждом интерфейсе: кнопки, ссылки, карточки и др. Пользовательскую категорию формирует проектировщик для конкретного интерфейса. В основе пользовательских категорий лежат внутрисистемные сущности. Например, для музыкального приложения сформируются категории «исполнители», «плей-листы», «альбомы».

Визуальное представление стандартных категорий может отличаться в разных интерфейсах. Но стоит учитывать, что у пользователей есть ожидания и привычки. Так, люди ожидают прямоугольные кнопки и синие ссылки с подчеркиванием.

Максимизация данного принципа приводит к выводу о том, что любые неодинаковые элементы должны максимально отличаться. Однако в таком неоднородном интерфейсе каждый элемент будет выглядеть независимым. В представлении пользователя не выстроятся общие принципы взаимодействия. Ему придется отдельно изучать каждый элемент. Это сильно замедлит и усложнит работу с интерфейсом.

Поэтому проектировщики стараются разработать единообразный интерфейс, в котором категории определяются набором свойств элементов. Например, все интерактивные элементы имеют одинаковую тень или все названия товаров набраны одинаковым текстом. Элемент может принадлежать к нескольким категориям сразу. Тогда он будет сочетать визуальные свойства этих категорий. Этот принцип создает в представлении пользователя связь визуального представления объекта и его функции. Эти связи будут работать во всех частях интерфейса или даже в системе из нескольких интерфейсов. Пользователь будет знать, по каким правилам работает каждый раздел интерфейса до взаимодействия с ним. Таким образом строятся, например, дизайн-системы [13, 14].

Заключение

Рассмотрены основные принципы и ценности, на которые стоит опираться, проектируя цифровой интерфейс. На основе этих принципов строятся решения для конкретного интерфейса. Необходимо помнить, что каждый раз систему проектируют под разные задачи, для разных пользователей. Поэтому абсолютно эффективных решений быть не может. Уверенность в качестве интерфейса достигается только после проверки на реальных пользователях. Этот путь связан с большим количеством ошибок и правок. Описанные принципы позволят принимать удачные решения чаще.

В такой активно развивающейся области полезно постоянно следить за новыми технологиями и тенденциями развития дисциплины.

Разнообразие устройств и платформ усложняет унификацию интерфейса. Взаимодействие с сервисом через умные часы принципиально отличается от взаимодействия с тем же сервисом через телевизор. Продолжает расти популярность мобильных устройств. Хотя большинство моделей пришли к единому стандартному набору технологий, все еще появляются оригинальные идеи. Например, смартфоны со складным экраном.

Отдельного рассмотрения заслуживают голосовые ассистенты. Привычные нам помощники появились еще в 2007 г. Но только в последние годы они стали активно использоваться рядовыми пользователями. Во многом это произошло за счет взаимодействия: команд стало больше, ассистенты стали понимать и релевантно отвечать почти на все. Голосовые интерфейсы проектируются совсем иначе, поскольку проектировщик оперирует не визуальными объектами, а словами и звуками. Хотя принципы эффективной коммуникации все еще будут полезны

Проектировщики отмечают потенциал XR (Extended reality) технологий. Это понятие объединяет VR (виртуальная реальность) и AR (дополненная реальность). Интерфейсы расширенной реальности заметно отличаются от экранных интерфейсов. Но фундаментальные принципы все же остаются применимы. XR делает взаимодействие с системой менее опосредованным и открывает новые возможности для повышения эффективности работы с системой.

Список литературы

1. Малышев К. В. Построение пользовательских интерфейсов. М. : ДМК Пресс, 2021. 268 с.

2. Баканов А. С., Обознов А. А. Эргономика пользовательского интерфейса: от проектирования к моделированию человеко-компьютерного взаимодействия. М. : Институт психологии РАН, 2011. 176 с.
3. Спицина И. А., Аксенов К. А. Применение системного анализа при разработке пользовательского интерфейса информационных систем : учеб. пособие. Екатеринбург : УрФУ, 2018. 100 с.
4. Мандел Т. Разработка пользовательского интерфейса. М. : ДМК Пресс, 2007. 416 с.
5. Купер А., Кронин Д., Рейман Р. Об интерфейсе. Основы проектирования взаимодействия / пер. с англ. М. Зилис. М. : Символ-Плюс, 2009. 681 с.
6. Купер А., Кронин Д., Рейман Р., Носсел К. Интерфейс. Основы проектирования взаимодействия / пер. с англ. Е. А. Матвеев. Санкт-Петербург : Питер, 2018. 720 с.
7. Круг С. Не заставляйте меня думать. Веб-юзабилити и здравый смысл / пер. с англ. М. А. Райтман. М. : Бомбора, 2017. 252 с.
8. Сергеев С. Ф. Инженерная психология и эргономика : учеб. пособие. М. : НИИ школьных технологий, 2008. 176 с.
9. Попов А. А. Эргономика пользовательских интерфейсов в информационных системах : учеб. пособие. М. : КноРус, 2021. 306 с.
10. Бурукина И. П., Привалов А. Э. Адаптивные технологии разработки информационных ресурсов для лиц с ОВЗ // Цифровая трансформация современного образования : сб. материалов Всерос. науч.-метод. конф. с междунар. участием, Чебоксары, 2 ноября 2020 г. / Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение «Средняя общеобразовательная школа №12» города Чебоксары Чувашской Республики. Чебоксары : ООО «Издательский дом «Среда», 2020. С. 15–20.
11. Burukina I. Object control: hidden modals / Marušič, Franc; Mišmaš, Petra; Žaucer, Rok (ред.). *Advances in Formal Slavic Linguistics* Berlin, Germany : Language Science Press. 2017. С. 1–14.
12. Burukina I. Mandative verbs and deontic modals in Russian: Between obligatory control and overt embedded subjects. *GLOSSA: A JOURNAL OF GENERAL LINGUISTICS*. 2020. Vol. 5:1. С. 1–54.
13. Норман Д. Дизайн привычных вещей / пер. с англ. А. Семина. М. : МИФ, 2018. 384 с.
14. Унгер Р., Чендлер К. UX-дизайн. Практическое руководство по проектированию опыта взаимодействия / пер. с англ. Е. А. Матвеев. М. : Символ-Плюс, 2011. 327 с.

References

1. Malyshev K.V. *Postroenie pol'zovatel'skikh interfeysov = Building user interfaces*. Moscow: DMC Press, 2021:268. (In Russ.)
2. Bakanov A.S., Oboznov A.A. *Ergonomika pol'zovatel'skogo interfeysa: ot proektirovaniya k modelirovaniyu cheloveko-komp'yuternogo vzaimodeystviya = Ergonomics of the user interface: from design to modeling of human-computer interaction*. Moscow: Institut psikhologii RAN, 2011:176. (In Russ.)
3. Spitsina I.A., Aksenov K.A. *Primenenie sistemnogo analiza pri razrabotke pol'zovatel'skogo interfeysa informatsionnykh sistem: ucheb. posobie = Application of system analysis in the development of the user interface of information systems: textbook*. Ekaterinburg: UrFU, 2018:100. (In Russ.)
4. Mandel T. *Razrabotka pol'zovatel'skogo interfeysa = User interface development*. Moscow: DMC Press, 2007:416. (In Russ.)
5. Kuper A., Kronin D., Reyman R. *Ob interfeyse. Osnovy proektirovaniya vzaimodeystviya = On the interface. Interaction design fundamentals*. Transl. from Eng. by M. Zilis. Moscow: Simvol-Plyus, 2009:681. (In Russ.)

6. Kuper A., Kronin D., Reyman R., Nossel K. *Interfeys. Osnovy proektirovaniya vzaimodeystviya = Interface. Interaction design fundamentals*. Transl. from Eng. by E. A. Matveev. Saint-Petersburg: Piter, 2018:720. (In Russ.)
7. Krug S. *Ne zastavlyayte menya dumat'. Veb-yuzabiliti i zdravyy smysl = Don't make me think. Web usability and common sense*. Transl. from Eng. by M. A. Raytman. Moscow: Bombora, 2017:252. (In Russ.)
8. Sergeev S.F. *Inzhenernaya psikhologiya i ergonomika: ucheb. posobie = Engineering psychology and ergonomics: textbook*. Moscow: NII shkol'nykh tekhnologiy, 2008:176. (In Russ.)
9. Popov A.A. *Ergonomika pol'zovatel'skikh interfeysov v informatsionnykh sistemakh: ucheb. posobie = Ergonomics of user interfaces in information systems: textbook*. Moscow: KnoRus, 2021:306. (In Russ.)
10. Burukina I.P., Privalov A.E. Adaptive technologies for the development of information resources for persons with disabilities. *Tsifrovaya transformatsiya sovremennogo obrazovaniya: sb. materialov Vseros. nauch.-metod. konf. s mezhdunar. uchastiem, Cheboksary, 2 noyabrya 2020 g. = Digital transformation of modern education: proceedings of All-Russian scientific and methodical conference with international participation, Cheboksary, November 2, 2020*. Cheboksary: OOO «Izdatel'skiy dom «Sreda», 2020:15–20. (In Russ.)
11. Burukina I. *Object control: hidden modals*. Advances in Formal Slavic Linguistics Berlin, Germany: Language Science Press. 2017:1–14.
12. Burukina I. *Mandative verbs and deontic modals in Russian: Between obligatory control and overt embedded subjects*. GLOSSA: A JOURNAL OF GENERAL LINGUISTICS. 2020;5:1–54.
13. Norman D. *Dizayn privychnykh veshchey = Design of everyday things*. Transl. from Eng. by A. Semin. Moscow: MIF, 2018:384. (In Russ.)
14. Unger R., Chendler K. *UX-dizayn. Prakticheskoe rukovodstvo po proektirovaniyu opyta vzaimodeystviya = UX-design. A practical guide to experience design*. Transl. from Eng. by E. A. Matveev. Moscow: Simvol-Plyus, 2011:327. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Петровна Бурукина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры систем
автоматизированного проектирования,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: burukinairina@gmail.com

Irina P. Burukina

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of computer-aided
design systems, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Эдуардович Привалов

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: AndreW130701@gmail.com

Andrey E. Privalov

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.01.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 02.02.2022

Принята к публикации / Accepted 20.02.2022

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 62-791.2

doi:10.21685/2072-3059-2022-1-8

Оптико-электронные информационно-измерительные системы определения абсолютного положения объекта

Т. И. Мурашкина¹, Е. А. Бадеева², К. С. Самохина³, А. В. Бадеев⁴, А. А. Толова⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹timurashkina@mail.ru, ²badeeva_elena@mail.ru,

³cbazykin@yandex.ru, ⁴badeyev@mail.ru, ⁵nbeshkova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время при модернизации отечественной ракетно-космической и авиационной техники (РК и АТ) особое внимание уделяется точности изготовления крупногабаритных корпусных деталей, входящих в состав ответственных изделий. Точность изготовления крупногабаритных деталей определяется минимизацией допусков на размеры, а также применяемыми для этого средствами измерений. Объектом исследования являются оптико-электронные информационно-измерительные системы (ОЭИИС) для определения линейных размеров крупногабаритных деталей объектов РК и АТ и определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве. Предметом исследования являются научно-технические решения определения конструктивных параметров и связей оптических и электрических схем, обеспечивающие создание ОЭИИС с определением абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных размеров крупногабаритных изделий. Цель работы – повышение точности измерений и достоверности линейных размеров крупногабаритных корпусных деталей изделий РК и АТ путем совершенствования оптической системы ОЭИИС и разработки новых методов определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве. *Материалы и методы.* При проведении исследований использовались теория точности измерительных систем, математического анализа, интегрального и дифференциального исчисления, методы геометрической оптики, математическая обработка полученных результатов, моделирование и графические построения в программах Microsoft Office, Libre Office, MathCAD, положения теории измерений. *Результаты.* Разработан способ определения пространственных точек, обеспечивающий снижение накопленной погрешности измерения, отличающийся тем, что оптические пучки разделяются по поляризации и по частоте, причем один оптический пучок проходит по вертикальной, а другой – по горизонтальной поляризации, по аб-

© Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Самохина К. С., Бадеев А. В., Толова А. А., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

солютному значению разности фаз двух оптических измерительных сигналов определяется абсолютное положение объекта в пространстве. Определена структура ОЭИИС с акустооптическим преобразованием оптических сигналов, реализующая предложенный способ. *Выводы.* На основании предложенного способа определения пространственных точек разработана ОЭИИС с повышенной точностью результатов измерения для определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных перемещений в процессе изготовления крупногабаритных корпусных деталей летательных аппаратов.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, оптико-электронное устройство, погрешность, крупногабаритная деталь, абсолютное положение, пространственная точка, акустооптический модулятор

Для цитирования: Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Самохина К. С., Бадеев А. В., Голова А. А. Оптико-электронные информационно-измерительные системы определения абсолютного положения объекта // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 88–100. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-8

Optoelectronic information-measuring systems for determining the absolute position of an object

T.I. Murashkina¹, E.A. Badeeva², K.S. Samokhina³, A.V. Badeev⁴, A.A. Tolova⁵

^{1,2,3,4,5}Penza State University, Penza, Russia

¹timurashkina@mail.ru, ²badeeva_elena@mail.ru,

³cbazykin@yandex.ru, ⁴badeyev@mail.ru, ⁵nbeshkova@mail.ru

Abstract. *Background.* Currently, during the modernization of domestic rocket, space and aviation equipment (RS and AE), special attention is paid to the accuracy of manufacturing large-sized body parts that are part of responsible products. The accuracy of manufacturing large-sized parts is determined by minimizing dimensional tolerances, as well as the measuring instruments used for this. The object of the study is optical-electronic information-measuring systems (OEIMS) for determining the linear dimensions of large-sized parts of objects of RS and AE and determining the absolute position of the measured object in space. The subject of the research is scientific and technical solutions for determining the design parameters and connections of optical and electrical circuits, providing the creation of OEIMS with the determination of the absolute position of the measured object in space when measuring the linear dimensions of large-sized products. The purpose of the research is to increase the measurement accuracy and reliability of the linear dimensions of large-sized body parts of RS and AE products by improving the optical system of OEIMS and developing new methods for determining the absolute position of the measured object in space. *Materials and methods.* During the research, the theory of accuracy of measuring systems, mathematical analysis, integral and differential calculus, methods of geometric optics, mathematical processing of the results obtained, modeling and graphical constructions in the programs Microsoft Office, Libre Office, MathCAD, SolidWorks, the provisions of the theory of measurements were used. *Results.* A method for determining spatial points has been developed that reduces the accumulated measurement error, characterized in that the optical beams are separated by polarization and frequency, with one optical beam passing along vertical and the other along horizontal polarization, the absolute value of the phase difference of the two optical measuring signals determines the absolute position of the object in space. The structure of OEIMS with acousto-optic conversion of optical signals implementing the proposed method is determined. *Conclusions.* Based on the proposed method for determining spatial points, an OEIMS with increased accuracy of measurement

results has been developed to determine the absolute position of the measured object in space when measuring linear displacements during the manufacture of large-sized body parts of aircraft.

Keywords: information-measuring system, optoelectronic device, error, large-sized part, absolute position, spatial point, acousto-optic modulator

For citation: Murashkina T.I., Badeeva E.A., Samokhina K.S., Badeev A.V., Tolova A.A. Optoelectronic information-measuring systems for determining the absolute position of an object. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):88–100. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-8

Введение

В настоящее время при модернизации отечественной ракетно-космической и авиационной техники (РК и АТ) особое внимание уделяется точности изготовления крупногабаритных корпусных деталей, входящих в состав ответственных изделий [1]. Точность изготовления крупногабаритных деталей определяется минимизацией допусков на размеры, а также применяемыми для этого средствами измерений.

Для измерения линейных размеров деталей используются оптико-электронные информационно-измерительные системы (ОЭИИС), реализующие интерференционный принцип преобразования измерительных сигналов [2–4].

Работа гетеродинных интерференционных оптико-электронных устройств основана на преобразовании значения фазы оптической волны, проходящей измеряемое расстояние, в значение фазы выходного электрического сигнала с последующим измерением значения фазы этого сигнала фазометрическим устройством [5]. Изменению фазы выходного измерительного электрического сигнала на 360° соответствует изменение положения отражателя интерферометра или контролируемой поверхности на значение, равное или меньшее пространственного периода оптической волны.

С одной стороны, это является преимуществом интерференционных устройств, так как позволяет получить высокую разрешающую способность ОЭИИС порядка сотых долей микрона, но, с другой стороны, накладывает определенные трудности на процесс измерения линейных размеров, так как для измерения расстояния или линейного размера большего, чем длина оптической волны, необходимо переместить отражатель интерферометра или контролируемую поверхность, одновременно последовательно накапливая информацию об измеряемой величине. При этом случайный обрыв оптической связи приводит к потере измерительной информации, и в этом случае необходимо повторение процесса измерения, что снижает быстродействие ОЭИИС.

Применение данных устройств для определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при проведении процесса измерения линейных размеров изделий накладывает определенные трудности из-за малого размера оптической длины волны.

Для уменьшения погрешности измерения физических параметров и повышения точности измерительной информации необходимо получать информацию об определении абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве, применение которого способствует развитию теоретических положений проектирования перспективных ОЭИИС.

В нашей стране основы теории и принципы построения ОЭИИС разрабатываются в Московском государственном технологическом университете СТАНКИН и Новосибирском институте автоматики и электрометрии. За рубежом разработкой и выпуском информационно-измерительных систем (ИИС) подобного типа занимаются фирмы Hewlett-Packard (США), Renishaw (Великобритания), Carl Zeiss (Германия) и другие компании. Большой вклад в разработку теории и принципов построения ОЭИИС внесли ученые В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, Л. Ф. Порфирьев, В. Е. Привалов, Т. И. Мурашкина, В. И. Телешевский, А. И. Фомин, Ю. Г. Якушенков и др. [6–8]. Но до настоящего времени отсутствуют системные методологические исследования, посвященные разработке ОЭИИС абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве для изделий РК и АТ.

Цель работы: повышение точности измерений линейных размеров крупногабаритных корпусных деталей изделий РК и АТ путем совершенствования оптической системы ОЭИИС и разработки новых методов определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве.

Методология и методы исследования

При проведении исследований использовались теория точности измерительных систем, линейной алгебры и аналитической геометрии, математического анализа, интегрального и дифференциального исчисления, математической физики, методы геометрической оптики, решения оптимизационных задач, численного анализа, математическая обработка полученных результатов, моделирование и графические построения в программах Microsoft Office, Libre Office, MathCAD, SolidWorks, положения теории измерений при планировании и проведении экспериментов.

Работа ОЭИИС, использующих фазовый метод обработки информации, основана на различных физических эффектах. Определено, что наиболее точным и перспективным является акусто-оптический принцип преобразования измерительной информации в ОЭИИС [9] (рис. 1).

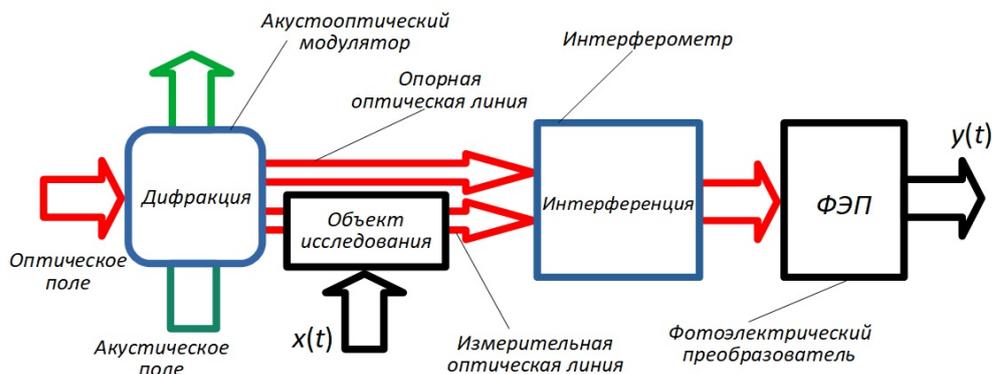


Рис. 1. Структурная схема ОЭИИС, осуществляющей акусто-оптическое преобразование измерительной информации

Оптическое поле от источника оптического излучения взаимодействует с акустическим полем в акустооптическом модуляторе (АОМ).

В результате этого оптические пучки разделяют на дифракционные оптические порядки, которые направляют по опорной и измерительной оптическим линиям [10]. На измерительную оптическую линию воздействует входной сигнал $x(t)$, изменяя характеристики оптического измерительного пучка. Оптические пучки опорной и измерительной оптических линий соединяют в интерферометре и направляют на фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), формирующий электрический сигнал $y(t)$, который несет в себе измерительную информацию.

Бесконтактные оптические методы измерения линейных размеров в течение многих лет использовали явления интерференции и дифракции, однако обычные источники света не позволяли полностью раскрыть возможности этих методов. Высокая когерентность и монохроматичность лазерного излучения позволяют проводить измерения с большой точностью и на расстояниях, значительно превышающих те, которые доступны ИИС с обычными (некогерентными) источниками света. При использовании некогерентных источников света самое большое расстояние, которое может быть измерено интерферометрическим способом, около 500 мм. При использовании лазера в качестве источника оптического излучения диапазон измерения расширяется до 100 м. Этого достаточно для того, чтобы применить интерференционный прибор при монтаже ракеты или самолета, отсчете точных перемещений узлов крупногабаритного прецизионного оборудования и т.д.

Известные ОЭИИС проводят измерение перемещений объекта относительно какой-то точки в пространстве. При решении ряда задач возникает необходимость определения абсолютного положения объекта в пространстве при измерении линейных размеров, вычисленных с высокой точностью.

Возможность определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных размеров в лазерных фазовых измерительных системах существенно повышает точность измерений линейных размеров крупногабаритных деталей в составе перспективных изделий РК и АТ путем совершенствования оптической системы ОЭИИС.

Изменение фазы измерительных электрических сигналов в фотоэлектрических преобразователях ФЭП1 и ФЭП2 относительно значения опорной фазы определяется уравнением

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt, \quad (1)$$

где $(t_2 - t_1)$ – интервал времени движения подвижного оптического отражателя (ПОО); $v(t)$ – значение изменения частоты измерительной оптической волны при движении ПОО за счет эффекта Доплера; λ – длина волны оптического излучения [10].

Диапазоном измерения в фазовых ОЭИИС для определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных размеров изделий является значение расстояния по направлению распространения оптического излучения, при котором фаза выходного электрического сигнала изменяется на период. Это расстояние, на котором возможно такое периодическое измерение, зависит от степени временной когерентности применяемого источника оптического излучения.

Для определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных размеров изделий необходимо иметь размер пространственного периода измерительного сигнала, равный требуемому диапазону измерений. Перемещение подвижного объекта измеряется количеством счетных импульсов, формируемых отсчетным устройством во время движения измеряемого объекта. Измерительная информация при возникновении внешних помех во время проведения измерительной процедуры искажается, возникает погрешность измерения из-за неправильного подсчета измерительных импульсов. Тогда процесс измерения необходимо повторять заново.

Полностью устранить данный недостаток ОЭИИС, которые используют фазовый метод формирования измерительной информации, невозможно.

Результаты

Уменьшения погрешности измерения, обусловленной влиянием внешних помех, можно добиться формированием по трассе измерения промежуточных пространственных точек. Для их формирования в оптико-электронных устройствах используют разность фаз двух ортогонально поляризованных оптических сигналов, формируемых когерентным источником оптического излучения, например, ЛГН-303 [11].

Разработан способ определения пространственных точек, отличающийся тем, что оптические пучки разделяются по поляризации и, соответственно, по частоте, причем один оптический пучок проходит по вертикальной, а другой – по горизонтальной поляризации. При этом разность фаз между измерительными сигналами нарастает при проведении измерений, по абсолютному значению разности фаз оптических измерительных сигналов определяется абсолютное положение объекта в пространстве. При этом уменьшается накопленная погрешность измерения. Алгоритм вычисления расстояния между ближайшими пространственными точками, реализующий данный способ, приведен на рис. 2:

1) определяются действительные значения длин волн оптических пучков λ_1 и λ_2 делением их паспортных значений на показатель преломления воздуха n ;

2) в зависимости от значений λ_1 и λ_2 организуются два взаимоисключающих цикла с постуловием, где при проведении процесса измерения и движении подвижного измерительного объекта отсчетные устройства (ОУ) подсчитывают количество целых длин волн оптических пучков N , которые уложились в измеряемое расстояние;

3) когда первое ОУ относительно второго ОУ насчитает на один целый период длины волны оптического излучения больше, это означает, что подвижный объект находится в расположении следующей пространственной точки.

Разработана ОЭИИС на основе двухчастотного лазера, реализующая новый способ измерения, в ОЭИИС добавили поляризационный куб, разделяющий оптические пучки по поляризации (рис. 3).

Источник оптического излучения (ИОИ) формирует две длины волны λ_1 и λ_2 , вложенные друг в друга. Один оптический пучок имеет вертикальную поляризацию, а другой горизонтальную поляризацию. Оптическое излучение от источника оптического излучения подается на акустооптический модулятор (АОМ), где происходит дифракция света на ультразвуке и формируются

дифракционные максимумы разночастотных оптических сигналов (« P_0 », « P_{+1} », « P_{-1} »). Пучки имеют одинаковое пространственное направление и проходят одинаковые оптические пути по схеме до поляризационного куба (КП). Далее оптические пучки проходят зеркала ЗО1, ЗО2, ЗО3, неподвижный оптический отражатель (НОО) и подвижный оптический отражатель (ПОО), оптический куб КО, на котором происходит интерференция двух когерентных оптических пучков. На поляризационном кубе КП происходит разделение оптических пучков, прошедших одинаковое измеряемое расстояние, по поляризации и, соответственно, по частоте.

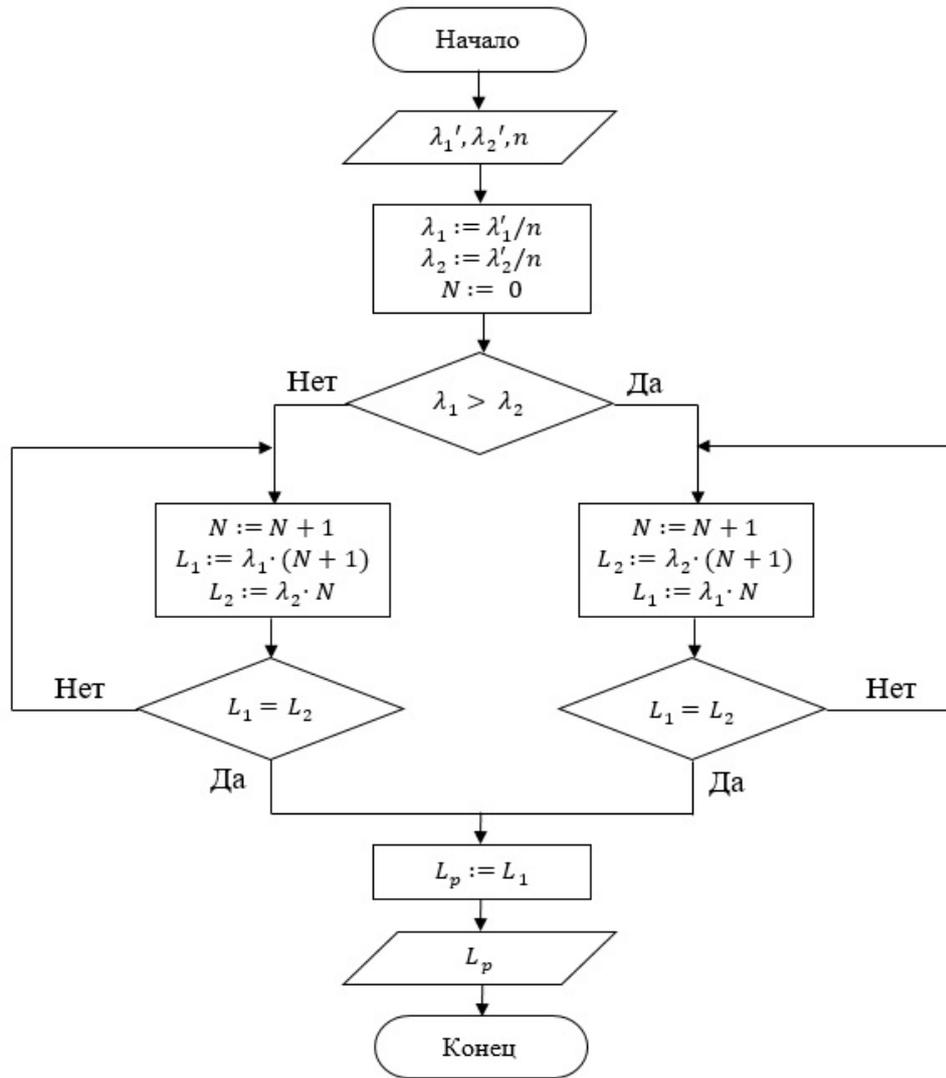


Рис. 2. Алгоритм вычисления расстояния между ближайшими пространственными точками

На первый фотоэлектрический преобразователь ФЭП1 поступает оптический сигнал с длиной волны λ_1 , а на второй фотоэлектрический преобразо-

ватель ФЭП2 – с длиной волны λ_2 . ФЭП1 и ФЭП2 формируют электрические импульсы, соответствующие пройденному расстоянию подвижного отражателя ПОО. Однако из-за того, что поляризованные оптические пучки имеют разные длины волн, фотоэлектрические преобразователи насчитывают различное количество целых длин волн оптического излучения N_1 и N_2 , причем $N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2$.

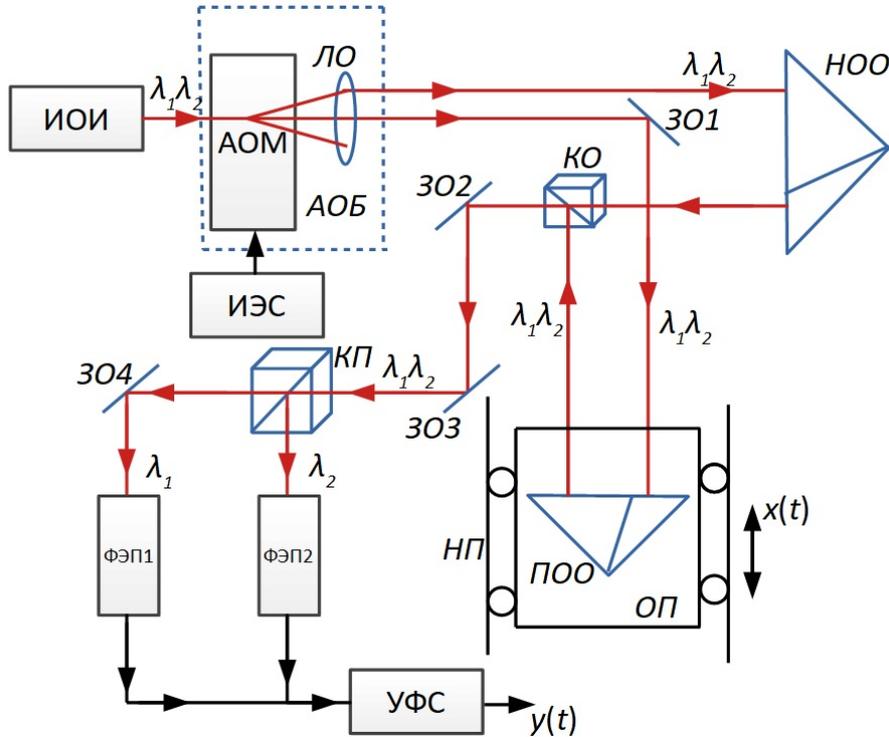


Рис. 3. Функциональная схема ОЭИИС определения пространственных точек

С выходов ФЭП1 и ФЭП2 электрические сигналы подают на узел формирования сигнала (УФС), где определяется значение разности фаз двух электрических измерительных сигналов в определенное время t . При движении ПОО значения фаз измерительных сигналов меняются, значение разности фаз двух измерительных сигналов также меняется. В момент времени, когда абсолютное значение разности фаз будет равно абсолютному значению разности фаз в момент времени t , отражатель ПОО достигнет следующей пространственной точки и в УФС будет сформирован сигнал при выполнении условия

$$\begin{cases} L_{mn} = N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2, \\ N_1 = N_2 + 1. \end{cases} \quad (2)$$

Подставляя в эту систему уравнений действительные значения длин волн оптического излучения λ_1 и λ_2 , получаем уравнение для определения расстояния между двумя пространственными точками L_{mn} :

$$L_{mn} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (3)$$

Например, для источника оптического излучения ЛГН-303 это значение равно 0,5 м.

Так как оптический измерительный пучок проходит измеряемое расстояние дважды, к ПОО и от него, то через равные пространственные промежутки $L_{mn}/2$ УФС будет формировать электрические измерительные сигналы. По этим сигналам определяют прохождение ПОО по трассе измерения пространственных точек и абсолютное положение измеряемого объекта в пространстве в пределах одной пространственной точки.

Определено, что погрешность определения пространственных точек будет зависеть от действительного значения длин волн двух оптических пучков ИОИ и значения показателя преломления воздуха на трассе измерения.

Разработан способ снижения погрешности измерения ОЭИИС, основанный на использовании пространственных точек, расположенных по измеряемой трассе, и нониусного метода измерения, реализуемого с помощью разработанного электронного блока преобразования измерительной информации (БПИИ) (рис. 4).

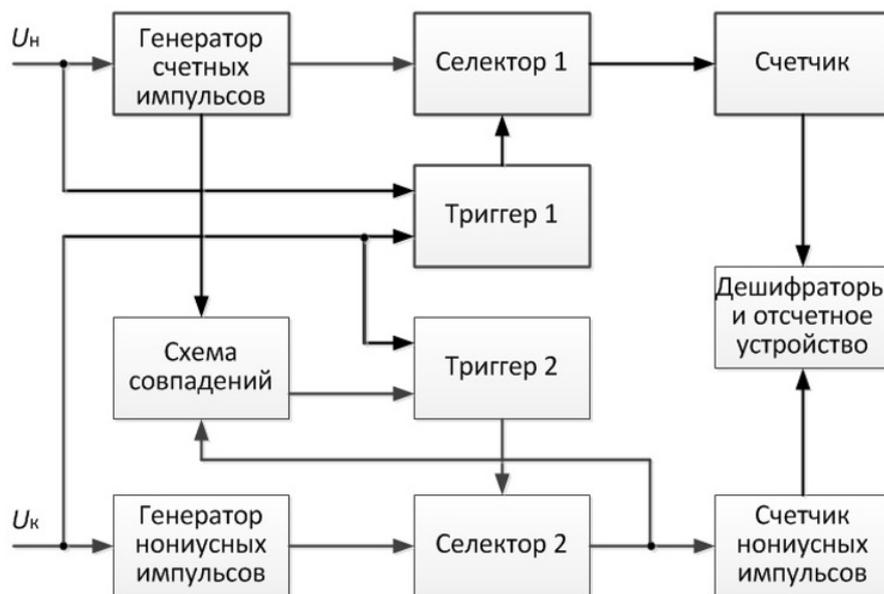


Рис. 4. Структурная схема БПИИ, реализующая способ снижения погрешности измерения ИИС

Импульс начала процесса измерения запускает генератор счетных импульсов и открывает Триггер 1. Выходной импульс триггера открывает Селектор 1 и начинается счет импульсов.

Импульс конца процесса измерения устанавливает Триггер 1 в исходное положение и счет импульсов прекращается. Этот импульс также запускает генератор нониусных импульсов (ГНИ), воздействует на Триггер 2, который открывает Селектор 2. Нониусные импульсы с ГНИ поступают на счет-

чик нониусных импульсов, схему совпадений и обладают периодом, определяемым выражением $T = (n-1)\frac{T_0}{n}$, где $\frac{T_0}{n}$ – шаг нониуса; T_0 – период следования импульсов измерительного сигнала; $n = 2, 3, 4, \dots$ Измеряемое расстояние между двумя пространственными точками L_{nn} определяется выражением: $L_{nn} = NT_0 + \Delta t_k$, где N – количество целых длин волн сигнала, уложившихся в расстоянии L_{nn} ; $\Delta t_k = \frac{kT_0}{n} - \Delta t_{кн}$, где k – коэффициент расширения нониусного счета; $\Delta t_{кн}$ – погрешность из-за несовпадения фронтов счетных и нониусных импульсов.

На графике зависимости погрешности измерения перемещения объекта ΔL от значения перемещения L линия 1 показывает погрешность измерения перемещения ОЭИИС до модернизации, линия 2 показывает погрешность измерения перемещения новой ОЭИИС с расположенными по трассе измерения пространственными точками (рис. 5).

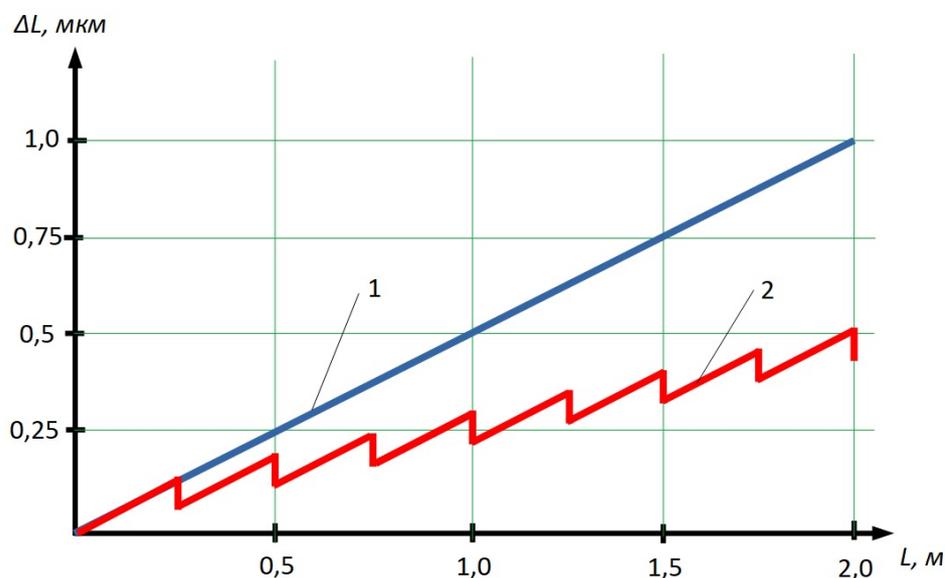


Рис. 5. График зависимости погрешности измерения перемещения объекта ΔL от значения перемещения L

Анализ полученной зависимости показал, что разработанная ИИС с расположенными по трассе измерения пространственными точками уменьшает погрешность измерения перемещения объекта в 2,5 раза.

Заключение

Применение разработанной ОЭИИС повышает точность измерения при изготовлении крупногабаритных корпусных изделий РК и АТ при случайных перерывах оптической связи или сбоях в системе сетевого питания, а также за счет уменьшения накопленной погрешности в каждой пространственной точке при прохождении подвижного отражателя по измеряемой трассе.

Список литературы

1. Сви́дерский В. П., Косов Д. С. Основы технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей РКТ с использованием комбинированной деформирующей обработки // Научные технологии производства РКТ. Вып. 2 М. : Сатурн-С, 2002. С. 33–38.
2. Самохина К. С., Капезин С. В. [и др.]. Лазерные измерительные системы с пространственно-временной разверткой интерференционного поля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 2. С. 156–161.
3. Базыкин С. Н. Информационно-измерительные системы на основе интерферометров : монография / под ред. д-ра техн. наук, проф. В. А. Васильева. Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. 132 с.
4. Samohina K. S., Badeeva E. A., Murashkina T. I., Bazykin S. N., Bazykina N. A., Gerashenko M. S. Laser optical fiber systems prospects use evaluation // IEEE Conference: 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). M., 2020. INSPEC: 19607010. doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067362
5. Базыкин С. Н., Самохина К. С., Первушкина Е. С. Взаимодействие оптических и акустических волн в гетеродинных лазерных интерферометрах // СВЕТ-2013 : сб. материалов науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. С. 113–116.
6. Штанько А. Е., Иванова С. Д. Опτικο-электронные измерительные системы. М. : СТАНКИН, 2013. 233 с.
7. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет опτικο-электронных приборов. М. : Машиностроение, 1999. 360 с.
8. Солодовников В. А. Фазовые опτικο-электронные преобразователи. М. : Машиностроение, 1986. С. 143–144.
9. Мухамадиев А. А., Ураксеев М. А., Фаррахов Г. Акустооптические приборы информационно-измерительных систем экологического мониторинга. М. : Машиностроение, 2009. 20 с.
10. Самохина К. С., Соломатина К. Д., Эршов Х. З. [и др.]. Анализ помехоустойчивости оптических схем информационно-измерительных систем // Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2013. С. 274–279.
11. Самохина К. С., Грибков В. А. [и др.]. Рассеяние оптического поля на акустических волнах // Волоконно-оптические, лазерные и нанотехнологии в наукоемком приборостроении СВЕТ-2018 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. С. 85–92.

References

1. Sviderskiy V.P., Kosov D.S. Fundamentals of manufacturing technology for large-sized thin-walled RCT body parts using combined deforming processing. *Naukoemkie tekhnologii proizvodstva RKT. Vyp. 2 = Science-intensive production technologies of RCT. Issue 2.* Moscow: Saturn-S, 2002:33–38. (In Russ.)
2. Samokhina K.S., Kapezin S.V. [et al.]. Laser measuring systems with spatio-temporal scanning of the interference field. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2015;(2):156–161. (In Russ.)
3. Bazykin S.N. *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy na osnove interferometrov: monografiya = Information and measuring systems based on interferometers: monograph.* Penza: Izd-vo PGU, 2014:132. (In Russ.)
4. Samohina K.S., Badeeva E.A., Murashkina T.I., Bazykin S.N., Bazykina N.A., Gerashenko M.S. Laser optical fiber systems prospects use evaluation. *IEEE Conference: 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT).* Moscow, 2020. INSPEC: 19607010. doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067362

5. Bazykin S.N., Samokhina K.S., Pervushkina E.S. Interaction of optical and acoustic waves in heterodyne laser interferometers. *SVET-2013: sb. materialov nauch.-tekhn. konf. = SVET-2013: proceedings of scientific and engineering conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2013:113–116. (In Russ.)
6. Shtan'ko A.E., Ivanova S.D. *Optiko-elektronnye izmeritel'nye sistemy = Optoelectronic measuring systems*. Moscow: STANKIN, 2013:233. (In Russ.)
7. Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov = Theory and calculation of optoelectronic devices*. Moscow: Mashinostroenie, 1999:360. (In Russ.)
8. Solodovnikov V.A. *Fazovye optiko-elektronnye preobrazovateli = Phase optoelectronic converters*. Moscow: Mashinostroenie, 1986:143–144. (In Russ.)
9. Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A., Farrakhov G. *Akustoopticheskie pribory informatsionno-izmeritel'nykh sistem ekologicheskogo monitoringa = Acousto-optic devices of information-measuring systems of ecological monitoring*. Moscow: Mashinostroenie, 2009:20. (In Russ.)
10. Samokhina K.S., Solomatina K.D., Ereshov Kh.Z. [et al.]. Analysis of noise immunity of optical circuits of information-measuring systems. *Molodezh' i nauka: modernizatsiya i innovatsionnoe razvitie strany: tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Youth and science: modernization and innovative development of the country: proceedings of scientific and practical conference*. Penza, 2013:274–279. (In Russ.)
11. Samokhina K.S., Gribkov V.A. [et al.]. Scattering of the optical field on acoustic waves. *Volokonno-opticheskie, lazernye i nanotekhnologii v naukoemkom priborostroenii SVET-2018: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Fiber-optic, laser and nanotechnologies in science-intensive instrumentation SVET-2018: proceedings of an international scientific and engineering conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2018:85–92. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Ивановна Мурашкина

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: timurashkina@mail.ru

Tat'yana I. Murashkina

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of instrument engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Елена Александровна Бадеева

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры бухгалтерского
учета, налогообложения и аудита,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: badeeva_elen@mail.ru

Elena A. Badeeva

Doctor of engineering sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of accounting, taxation and audit,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Кристина Сергеевна Самохина

ассистент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cbazykin@yandex.ru

Kristina S. Samokhina

Assistant of the sub-department
of instrument engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Александр Валентинович Бадеев

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник научно-
технического центра «Нанотехнологии
волоконно-оптических систем»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: badeyev@mail.ru

Aleksandr V. Badeev

Candidate of engineering sciences,
senior researcher of the Scientific Research
Center “Nanotechnology of fiber-optic sys-
tems”, Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Анастасия Андреевна Толова

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nbeshkova@mail.ru

Anastasiya A. Tolova

Master’s degree student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 12.01.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 07.02.2022

Принята к публикации / Accepted 25.02.2022

УДК 621.391:621.396.96
doi:10.21685/2072-3059-2022-1-9

Обнаружение когерентно-импульсных многочастотных сигналов

Д. И. Попов

Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В. Ф. Уткина, Рязань, Россия
adop@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается обнаружение когерентно-импульсных многочастотных эхо-сигналов на фоне некоррелированных (собственных) шумов приемника. Целью работы является синтез и анализ алгоритмов обнаружения квазидетерминированных и совместно флюктуирующих многочастотных сигналов. *Материалы и методы.* Исследование проводится на основе статистических методов – вычисления отношения правдоподобия и анализа характеристик обнаружения для приведенных моделей многочастотного сигнала. *Результаты.* Получены алгоритмы обнаружения при различном характере межпериодной обработки (когерентной или некогерентной) в частотных каналах. При когерентной межпериодной обработке отдельных компонент многочастотного сигнала обнаружение радиолокационной цели, движущейся с неизвестной скоростью, осуществляется отдельно в каждом частотном канале. При некогерентной межпериодной обработке компонент многочастотного сигнала обнаружение осуществляется по результатам линейного суммирования выходных величин частотных каналов. *Выводы.* На основе анализа характеристик обнаружения синтезированных алгоритмов установлено оптимальное число частотных каналов, при котором обеспечиваются выигрыши в пороговом сигнале по сравнению с использованием одного частотного канала.

Ключевые слова: алгоритм обработки, анализ, многочастотный сигнал, обнаружение, отношение правдоподобия, пороговое отношение сигнал/шум, синтез, характеристики обнаружения

Для цитирования: Попов Д. И. Обнаружение когерентно-импульсных многочастотных сигналов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 101–109. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-9

Detection of coherent-pulse multi-frequency signals

D.I. Popov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia
adop@mail.ru

Abstract. *Background.* The detection of coherent-pulse multi-frequency radar signals against the background of the receiver's own noise is considered. The purpose of this research is to synthesize and analyze algorithms for detecting quasi-deterministic and jointly fluctuating multi-frequency signals. *Materials and methods.* The study is carried out on the basis of statistical methods – calculating the likelihood ratio and analyzing the detection characteristics for the given models of multi-frequency signal. *Results.* Detection algorithms are obtained for different types of interperiod processing (coherent or incoherent) in frequency channels. In the case of coherent interperiodic processing of individual components of a multi-frequency signal, the detection of a target with an unknown Doppler speed is carried out separately in each frequency channel. In the case of incoherent interperiod

processing, detection is performed based on the results of linear summation of the output values of the frequency channels. *Conclusions.* Based on the analysis of the detection characteristics of the synthesized algorithms, the optimal number of frequency channels is established, at which gains in the signal-to-noise threshold ratio are achieved in comparison with the use of a single-frequency signal.

Keywords: processing algorithm, analysis, multi-frequency signal, detection, likelihood ratio, threshold signal-to-noise ratio, synthesis, detection characteristics

For citation: Popov D.I. Detection of coherent-pulse multi-frequency signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):101–109. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-9

Введение

Для защиты радиолокационных систем от разнообразных помех широкое распространение получили современные способы цифровой обработки отраженных от целей сигналов [1–5], а также когерентно-импульсные многочастотные сигналы, которые используются не только в радиолокации, но и в смежных областях науки и техники [6–13].

В книге [6] рассматривается обработка при условии одиночных импульсов в частотных каналах, а многочастотный сигнал считается «эквивалентным пачке отраженных сигналов с независимыми от импульса к импульсу случайными амплитудами», что приводит к известной обработке в виде квадратичного суммирования импульсов частотных каналов. При этом какое-либо описание многочастотных сигналов фактически отсутствует, обработка в каналах отсутствует, задача анализа сведена к известной, а одиночных импульсов в радиолокации не бывает. Такой подход не описывает полностью многочастотный сигнал и его обработку, так как реально в обзорных радиолокаторах в каждый частотный канал поступает пачка импульсов.

В предлагаемой статье используется в данном контексте другой подход:

- когерентно-импульсный пачечный сигнал в частотных каналах;
- статистическое описание многочастотных сигналов;
- алгоритмы обработки в частотных каналах и выбор алгоритма объединения каналов в зависимости от типа межпериодной обработки (когерентной или некогерентной) в частотных каналах;
- способ раздельного в каналах вынесения решения об обнаружении сигнала;
- адекватный поставленной задаче метод анализа;
- подтверждение оправданности и целесообразности раздельного обнаружения в каналах, приводящего к выигрышам в пороговом отношении сигнал/шум и, как следствие этого, к уменьшению мощности передатчика;
- существенные выигрыши в эффективности по отношению к известным в литературе результатам.

Предлагаемые алгоритмы и их анализ представляют собой развитие статистической теории межпериодной обработки когерентно-импульсных многочастотных радиолокационных сигналов.

Квазидетермированный сигнал

Сигнал в виде когерентной пачки N радиоимпульсов, отраженных от движущейся цели и следующих через период повторения T , в каждом из M

частотных каналов описывается квазидетерминированной (детерминированной со случайной начальной фазой) последовательностью цифровых отсчетов комплексных огибающих $S_j^{(l)} = s_l \exp\{i(j\varphi_l + \varphi_{0l})\}$, где $\varphi_l = \Omega_{Дл}T$ – доплеровский сдвиг фазы в l -м частотном канале за период повторения T ; φ_{0l} – начальная фаза; $j = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, M}$. Отсчеты сигнала и их аддитивная смесь с внутренним шумом приемника образуют совокупности вектор-столбцов соответственно $\mathbf{S}_l = \{S_j^{(l)}\}^T$ и $\mathbf{U}_l = \{U_j^{(l)}\}^T$. При отсутствии сигнала совокупность $\{\mathbf{U}_l\} = \{\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_M\}$ соответствует некоррелированным шумовым отсчетам и описывается гауссовской плотностью вероятности $P_{\text{ш}}(\{\mathbf{U}_l\})$ с одинаковой для всех частотных каналов дисперсией $\sigma_{\text{ш}l}^2 = \overline{U_j^{(l)}U_j^{(l)*}} / 2 = \sigma_{\text{ш}}^2$. Наличие сигнала смещает распределение шума, т.е. $P_{\text{сш}}(\{\mathbf{U}_l\}) = P_{\text{ш}}(\{\mathbf{U}_l - \mathbf{S}_l\})$. Тогда

$$P_{\text{сш}}(\{\mathbf{U}_l\}) = \prod_{l=1}^M P_{\text{сш}}(\mathbf{U}_l) = \frac{1}{(2\pi\sigma_{\text{ш}}^2)^{MN}} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma_{\text{ш}}^2} \sum_{l=1}^M (\mathbf{U}_l^{\text{T}*} - \mathbf{S}_l^{\text{T}*})(\mathbf{U}_l - \mathbf{S}_l)\right\}.$$

Алгоритм оптимального обнаружения многочастотного сигнала найдем, вычислив условное отношение правдоподобия:

$$\Lambda(\{\mathbf{U}_l\} / \{\varphi_{0l}\}) = \frac{P_{\text{сш}}(\{\mathbf{U}_l\})}{P_{\text{ш}}(\{\mathbf{U}_l\})} = \prod_{l=1}^M \Lambda(\mathbf{U}_l / \varphi_{0l}), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \Lambda(\mathbf{U}_l / \varphi_{0l}) &= \exp\left\{\frac{1}{2\sigma_{\text{ш}}^2} (\mathbf{U}_l^{\text{T}*} \mathbf{S}_l + \mathbf{S}_l^{\text{T}*} \mathbf{U}_l - \mathbf{S}_l^{\text{T}*} \mathbf{S}_l)\right\} = \\ &= \exp\left\{\frac{1}{2\sigma_{\text{ш}}^2} \sum_{j=1}^N s_l e^{i(j\varphi_l + \varphi_{0l})} U_j^{(l)*} + s_l e^{-i(j\varphi_l + \varphi_{0l})} U_j^{(l)} - s_l^2\right\}. \end{aligned}$$

Начальная фаза φ_{0l} является случайной величиной с равномерным законом распределения $P(\varphi_{0l}) = 1/2\pi$, $0 \leq \varphi_{0l} \leq 2\pi$. Безусловное отношение правдоподобия вычисляется теперь путем соответствующего интегрирования:

$$\Lambda(\mathbf{U}_l) = \exp\left(-\frac{q}{2}\right) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{(s_l / \sigma_{\text{ш}}^2) |X_l| \cos(\varphi_{0l} - \arg X_l)\right\} d\varphi_{0l},$$

где $q = \frac{Ns_l^2}{\sigma_{\text{ш}}^2}$, $X_l = \sum_{j=1}^N e^{-ij\varphi_l} U_j^{(l)}$.

Данный интеграл сводится к табличному, приводящему к модифицированной функции Бесселя нулевого порядка $I_0(s_l |X_l| / \sigma_{\text{ш}}^2)$. Ввиду монотон-

ности функции $I_0(x)$ алгоритм обнаружения в l -м частотном канале принимает вид

$$u_l = |X_l|^2 = \left| \sum_{j=1}^N e^{-ij\phi_l} U_j^{(l)} \right|^2 \geq u_{0l}. \quad (2)$$

При неизвестной скорости цели построение алгоритма обнаружения (2) является многоканальным. Исключая неопределенность величины ϕ_l путем аналогичного работе [14] усреднения для k -го доплеровского канала, получаем

$$X_k^{(l)} = \sum_{j=1}^N h_j V^{(j-1)(k-1)} U_j^{(l)},$$

где $h_j = \text{sinc}[(j-1)\Delta\psi/2]$ – весовые коэффициенты, учитывающие ширину доплеровского канала; $V = e^{-i2\pi/N}$.

Данный алгоритм с учетом многоканальности обработки ($k = \overline{1, N}$) представляет собой дискретное преобразование Фурье взвешенных с коэффициентами h_j отсчетов $U_j^{(l)}$.

Для определения алгоритма обнаружения, инвариантного к доплеровской фазе ϕ_l , необходимо выполнить соответствующие усреднения в алгоритме (2) [7], тогда

$$v_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |X_l|^2 d\phi_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sum_{j,k=1}^N e^{-i(j-k)\phi_l} U_j^{(l)} U_k^{(l)*} d\phi_l.$$

Изменяя порядок интегрирования и суммирования, а также учитывая, что

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-i(j-k)\phi_l} d\phi_l = \text{sinc}[(j-k)\pi] = \begin{cases} 1, & j = k, \\ 0, & j \neq k, \end{cases}$$

получаем

$$v_l = \sum_{j=1}^N |U_j^{(l)}|^2. \quad (3)$$

Исходя из отношения правдоподобия (1) и последующих вычислений, приводящих к выражению (3), окончательно находим

$$v = \sum_{j=1}^M v_l = \sum_{l=1}^M \sum_{j=1}^N |U_j^{(l)}|^2.$$

Данный алгоритм соответствует некогерентному накоплению в каждом частотном канале с последующим линейным суммированием результатов накопления.

Совместно флюктуирующий сигнал

В случае совместно флюктуирующего сигнала аддитивная смесь сигнала и внутреннего шума в виде N цифровых отсчетов комплексных огибающих $U_j^{(l)} = x_j^{(l)} + i y_j^{(l)}$, следующих через период повторения T и образующих совокупность $\{\mathbf{U}_l\} = \{\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_M\}$, где вектор-столбец $\mathbf{U}_l = \{U_j^{(l)}\}^T$, $l = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$, описывается корреляционной матрицей $\mathbf{R}_l = \overline{\mathbf{U}_l \mathbf{U}_l^{T*}} / 2$, элементы которой соответствуют работе [7].

При статистической независимости отраженных сигналов, соответствующих различным несущим частотам, совместная плотность вероятности совокупности $\{\mathbf{U}_l\}$ имеет вид

$$P(\{\mathbf{U}_l\}) = \prod_{l=1}^M P(\mathbf{U}_l) = \left((2\pi)^{MN} \prod_{l=1}^M \det \mathbf{R}_l \right)^{-1} \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{l=1}^M \mathbf{U}_l^{T*} \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{U}_l \right), \quad (4)$$

где \mathbf{R}_l^{-1} – матрица, обратная \mathbf{R}_l ; причем при отсутствии сигнала ($\sigma_{c_l}^2 = 0$) матрицы \mathbf{R}_l и \mathbf{R}_l^{-1} являются диагональными с элементами соответственно $\sigma_{ш}^2 \delta_{jk}$ и $\delta_{jk} / \sigma_{ш}^2$.

Алгоритм оптимального обнаружения также определяется на основе отношения правдоподобия, которое с учетом выражения (4) найдем в виде

$$\Lambda(\{\mathbf{U}_l\}) = \prod_{l=1}^M \Lambda(\mathbf{U}_l) = \left(\prod_{l=1}^M C_l \right) \exp \left(\frac{1}{2} \sum_{l=1}^M \mathbf{U}_l^{T*} \mathbf{Q}_l \mathbf{U}_l \right), \quad (5)$$

где C_l – не зависящие от \mathbf{U}_l коэффициенты; \mathbf{Q}_l – матрица обработки для l -го частотного канала, элементы которой $Q_{jk}^{(l)}$ определяются уравнением

$$Q_{jk}^{(l)} + q_l \sum_{p=1}^N Q_{jp}^{(l)} \rho_{pk}^{(l)} e^{i(p-k)\varphi_l} = q_l \rho_{jk}^{(l)} e^{i(j-k)\varphi_l}, \quad (6)$$

в котором $q_l = \sigma_{c_l}^2 / \sigma_{ш}^2$ – отношение сигнал/шум в l -м частотном канале.

Из выражения (5) следует, что для обнаружения сигнала достаточно сравнить с пороговым уровнем величину

$$u = \sum_{l=1}^M u_l = \sum_{l=1}^M \mathbf{U}_l^{T*} \mathbf{Q}_l \mathbf{U}_l = \sum_{l=1}^M \sum_{j,k=1}^N Q_{jk}^{(l)} U_j^{(l)*} U_k^{(l)}. \quad (7)$$

Конкретный вид алгоритма обработки зависит от корреляционных свойств сигнала. Одной из моделей узкополосных сигналов являются медленные или совместные (дружные) флюктуации, соответствующие $\rho_{jk}^{(l)} = 1$

($1 \leq j, k \leq N$). Решение уравнения (6) в этом случае с точностью до постоянного множителя принимает вид $Q_{jk}^{(l)} = e^{i(j-k)\varphi_l}$. Тогда алгоритм обнаружения в l -м частотном канале записывается в аналогичном (2) виде:

$$u_l = \left| \sum_{j=1}^N e^{-ij\varphi_l} U_j^{(l)} \right|^2. \quad (8)$$

Решение о наличии сигнала при неизвестной скорости цели и N -канальном построении алгоритма обнаружения (8) принимается по результатам раздельного сравнения с пороговым уровнем обнаружения величин $u_k^{(l)}$ [8].

Инвариантный к доплеровским фазам алгоритм обнаружения определяется аналогично предыдущему разделу путем усреднения алгоритма (8) в интервале однозначности $[-\pi \dots \pi]$ величины φ_l . Полученный алгоритм также соответствует линейному суммированию результатов некогерентного накопления в каждом частотном канале.

Анализ характеристик обнаружения

Анализ характеристик обнаружения без приведения числовых результатов представлен в работе [8]. При этом получено выражение для вероятности правильного обнаружения сигнала хотя бы в одном частотном канале

$$D = 1 - \left[1 - (F / MN)^{1 / (1 + Nq / M)} \right]^M, \quad (9)$$

где F – вероятность ложной тревоги для многоканальной системы обнаружения в целом; q – отношение суммарной мощности многочастотного сигнала к шуму одного канала.

Характеристики обнаружения, рассчитанные в соответствии с выражением (9) при $N = 20$ и $F = 10^{-6}$, приведены на рис. 1. Эти характеристики иллюстрируют возможности многочастотного (в данном случае двухчастотного) сигнала повышать эффективность обнаружения.

В работе [8] из выражения (9) получено соотношение для порогового отношения сигнал/шум:

$$q = \frac{M}{N} \left\{ \frac{\log(F / MN)}{\log[1 - (1 - D)^{1/M}]} - 1 \right\}. \quad (10)$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по соотношению (10) при тех же значениях N и F зависимости порогового отношения сигнал/шум, позволяющие выбирать оптимальное число частотных каналов M . Данные зависимости подтверждают, что предложенная в данной работе обработка многочастотных сигналов обеспечивает существенные выигрыши в величине порогового отношения сигнал/шум по сравнению с результатами, приведенными в книге [6].

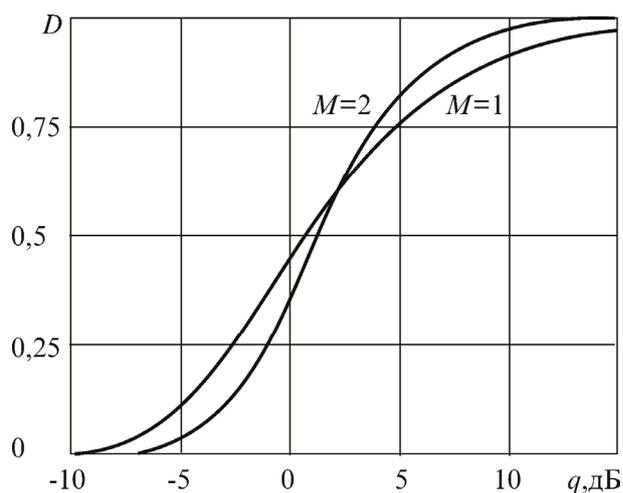


Рис. 1. Характеристики обнаружения при когерентной обработке одно- и двухчастотного сигнала

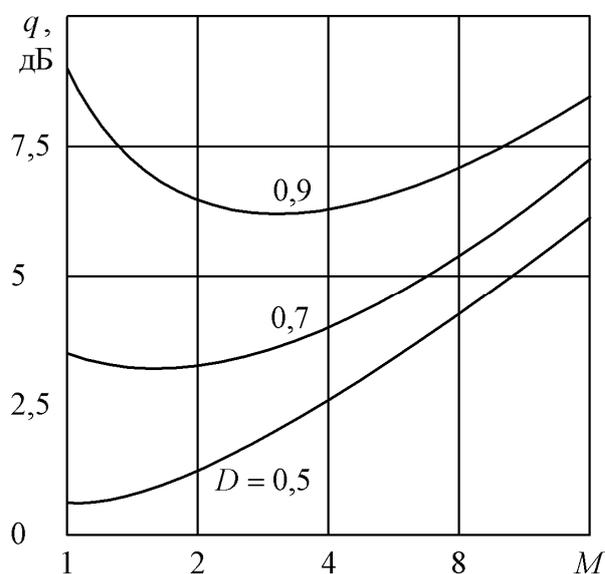


Рис. 2. Зависимости порогового отношения сигнал/шум от числа частотных каналов

Заключение

Таким образом, в результате статистического синтеза алгоритмов обнаружения многочастотных квазидетерминированных и совместно флуктуирующих сигналов установлено, что при когерентной межпериодной обработке отдельных компонент многочастотного сигнала обнаружение цели, движущейся с неизвестной скоростью, должно осуществляться отдельно в каждом доплеровском канале каждого частотного канала. При некогерентной межпериодной обработке в частотных каналах обнаружение осуществляется по результатам линейного суммирования выходных величин частотных каналов. На основе анализа характеристик обнаружения синтезированных алгоритмов когерентной обработки подтверждена целесообразность раздельного обнаружения сигналов в частотных каналах. При этом установлены зависи-

мости оптимального числа частотных каналов, при котором обеспечиваются выигрыши в пороговом отношении сигнал/шум по сравнению с одночастотным сигналом, что позволяет при заданных вероятностных показателях и дальности обнаружения упростить передатчик, уменьшив его мощность. Установлено, что эффективность предложенной обработки многочастотных сигналов характеризуется существенными выигрышами в величине порогового отношения сигнал/шум по сравнению с известными в литературе результатами.

Список литературы

1. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев : КВиЦ, 2000. 428 с.
2. Radar Handbook / ed. by M. I. Skolnik. 3rd ed. McGraw–Hill, 2008. 1352 p.
3. Principles of Modern Radar: Basic Principles / ed. by M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm. New York : SciTech Publishing, IET, Edison. 2010. 924 p.
4. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques / ed. by W. L. Melvin, J. A. Scheer. New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. 846 p.
5. Richards M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing. Second Edition. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 618 p.
6. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. М. : Советское радио, 1970. 560 с.
7. Попов Д. И. Оптимальная обработка многочастотных сигналов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2013. № 1. С. 32–39.
8. Попов Д. И. Оптимизация систем когерентно-весовой обработки многочастотных сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 4. С. 17–21.
9. Vertogradov G. G., Vertogradov V. G., Vertogradova E. G., Kubatko S. V. and Uryadov V. P. Drift velocity of small-scale artificial ionospheric irregularities according to a multifrequency HF doppler radar. II // Observation and modeling results. Radiophysics and Quantum Electronics. 2015. Vol. 58, № 6. P. 381–389. doi:10.1007/s11141-015-9613-2
10. Feketa P., Perestyuk Y. Perturbation theorems for a multifrequency system with pulses // Journal of Mathematical Sciences. 2016. Vol. 217, № 4. P. 515–524. doi:10.1007/s10958-016-2988-6
11. Collins L., Belianinov A., Somnath S., Balke N., Kalinin S. V., Jesse S., Rodriguez B. J. Multifrequency spectrum analysis using fully digital G mode-Kelvin probe force microscopy // Nanotechnology. 2016. Vol. 27, № 10. P. 105706. doi:10.1088/0957-4484/27/10/105706
12. Angelliaume S., Martineau P., Minchew B., Chataing S., Miegbielle V. Multifrequency Radar Imagery and Characterization of Hazardous and NOXIOUS Substances at Sea // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017. Vol. 55, № 5. P. 3051–3066. doi:10.1109/TGRS.2017.2661325
13. Bi D., Xie Y., Ma L., Li X., Yang X., Zheng Y. R. Multifrequency Compressed Sensing for 2-D Near-field Synthetic Aperture Radar Image Reconstruction // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. Vol. 66, № 4. P. 777–791. doi:10.1109/TIM.2017.2654578
14. Попов Д. И. Адаптивная обработка сигналов на фоне пассивных помех // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43, № 1. С. 59–68.

References

1. Kuz'min S.Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu = Digital radar. Introduction to theory*. Kiev: KViTs, 2000:428.
2. Skolnik M.I. (ed.). *Radar Handbook*. 3rd ed. McGraw–Hill, 2008:1352.

3. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. (eds.). *Principles of Modern Radar: Basic Principles*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison. 2010:924.
4. Melvin W.L., Scheer J.A. (ed.). *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013:846.
5. Richards M.A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. Second Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2014:618.
6. Shirman Ya.D. (ed.). *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii = Theoretical foundations of radar*. Moscow: Sovetskoe radio, 1970:560.
7. Popov D.I. Optimal processing of multi-frequency signals. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika = University proceedings. Radioelectronics*. 2013;(1):32–39. (In Russ.)
8. Popov D.I. Optimization of systems for coherent-weight processing of multi-frequency signals. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. 2013;(4):17–21. (In Russ.)
9. Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Vertogradova E.G., Kubatko S.V., Uryadov V.P. Drift velocity of small-scale artificial ionospheric irregularities according to a multifrequency HF doppler radar. II. *Observation and modeling results. Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015;58(6):381–389. doi:10.1007/s11141-015-9613-2
10. Feketa P., Perestyuk Y. Perturbation theorems for a multifrequency system with pulses. *Journal of Mathematical Sciences*. 2016;217(4):515–524. doi:10.1007/s10958-016-2988-6
11. Collins L., Belianinov A., Somnath S., Balke N., Kalinin S.V., Jesse S., Rodriguez B.J. Multifrequency spectrum analysis using fully digital G mode-Kelvin probe force microscopy. *Nanotechnology*. 2016;27(10):105706. doi:10.1088/0957-4484/27/10/105706
12. Angelliaume S., Martineau P., Minchew B., Chataing S., Miegbielle V. Multifrequency Radar Imagery and Characterization of Hazardous and NOXIOUS Substances at Sea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017;55(5):3051–3066. doi:10.1109/TGRS.2017.2661325
13. Bi D., Xie Y., Ma L., Li X., Yang X., Zheng Y.R. Multifrequency Compressed Sensing for 2-D Near-field Synthetic Aperture Radar Image Reconstruction. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017;66(4):777–791. doi:10.1109/TIM.2017.2654578
14. Popov D.I. Adaptive signal processing against the background of passive noise. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika = University proceedings. Radioelectronics*. 2000;43(1):59–68. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Иванович Попов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиотехнических
систем, Рязанский государственный
радиотехнический университет имени
В. Ф. Уткина (Россия, г. Рязань,
ул. Гагарина, 59/1)

E-mail: adop@mail.ru

Dmitriy I. Popov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of radio
engineering systems, Ryazan State
Radio Engineering University named
after V.F. Utkin (59/1 Gagarina street,
Ryazan, Russia)

Поступила в редакцию / Received 17.01.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 02.02.2022

Принята к публикации / Accepted 20.02.2022

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала «**Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки**» рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год. Научные специальности журнала:
05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
05.02.08 Технология машиностроения
05.02.11 Методы контроля и диагностика в машиностроении
05.11.01 Приборы и методы измерения (по видам измерений)
05.11.14 Технология приборостроения
05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)
05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)
05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. +7 (8412) 64-32-89. E-mail: volgavuz@pnzgu.ru

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата « ____ » _____ 20__ г.