

УДК 681.518.54

Д.В. Мирвода

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ

Рассмотрены вопросы цифрового моделирования алгоритмов диагностики линейных трактов радиотехнических систем в рабочем режиме на основе корреляционного метода измерения импульсной характеристики.

Цифровое моделирование; алгоритмы; радиотехнические системы.

D.V. Mirvoda

MODELLING OF ALGORITHMS OF DIAGNOSTICS OF LINEAR RADIO ENGINEERING SYSTEMS IN OPERATING CONDITIONS

Questions of digital modeling of algorithms of diagnostics of linear paths of radio engineering systems in operating conditions on the basis of a correlation method of measurement of the pulse characteristic are considered.

Digital modeling; algorithms; radio engineering systems.

Математическую модель линейной радиотехнической системы целесообразно представлять импульсной характеристикой узкополосной системы. В качестве основного метода получения вектора диагностически значимых признаков предлагается корреляционный метод измерения импульсной характеристики линейной системы [1], суть которого в следующем: импульсную характеристику следует получать в виде реакции $y(t)$ исследуемой линейной системы на стационарный широкополосный шум $x(t)$ (рис.1). На рис.1 линия задержки, схема умножения и интегратор образуют коррелометр. Процесс на его выходе будет пропорционален взаимно корреляционной функции процессов, поступающих на его вход.

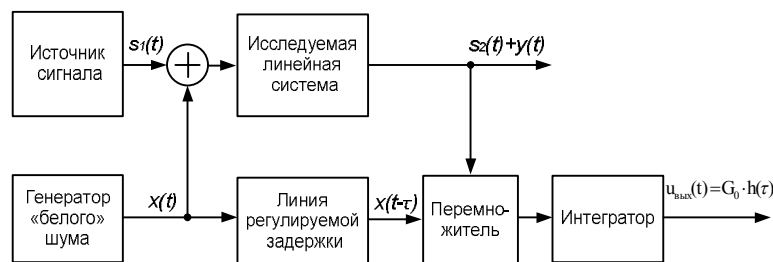


Рис. 1. Структурная схема корреляционного измерителя импульсной характеристики модели линейной системы

Исследуемая линейная система не выключается из рабочего режима, поэтому на её входе кроме процесса $x(t)$ будет также рабочий информационный сигнал $s_1(t)$. Корреляционная связь между входным и выходным сигналами определяется при помощи соотношения Винера–Ли:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau - \lambda) \cdot R_{xx}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $R_{xx}(\lambda)$ – автокорреляционная функция процесса (шума) на входе линейной системы, $h(\tau)$ – импульсная характеристика исследуемой линейной системы,

$R_{xy}(\tau)$ – взаимно корреляционная функция входного $x(t)$ и выходного $y(t)$ процессов линейной системы.

Если $x(t)$ – широкополосный шум, имеющий равномерный спектр в полосе частот, значительно превышающей полосу пропускания исследуемой системы, то можно заменить автокорреляционную функцию шума в выражении (1) импульсной характеристикой – автокорреляционной функцией идеального “белого” шума $G_0\delta(\lambda)$, где $\delta(\lambda)$ – функция Дирака, G_0 – масштабный коэффициент [1]. При этом

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau - \lambda) \cdot G_0 \cdot \delta(\lambda) d\lambda = G_0 \cdot h(\tau). \quad (2)$$

Как следует из выражения (2), взаимная корреляционная функция непосредственно дает выражение для оценки импульсной характеристики $h(\tau)$. Если тестовый шум некоррелирован с информационным сигналом, то подобные корреляционные измерения обычно можно выполнять во время нормальной работы системы [2]. Снижение случайных помех, свойственное корреляционному методу, позволяет использовать весьма малые испытательные сигналы $x(t)$, не нарушающие по существу нормальный режим работы системы (отношение $\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} > 40 \text{ дБ}$).

А.М. Ляпуновым было показано, что если на входе линейной системы с постоянной времени τ_c действует негауссовский случайный процесс $x(t)$ с временем корреляции τ_k ($\tau_c > \tau_k$), то процесс $n(t)$ на выходе такой системы приближается к нормальному по мере увеличения отношения τ_c/τ_k . Иными словами, случайный процесс на выходе узкополосной линейной системы нормализуется [3].

Так как утверждение о нормальности распределения выходного сигнала предполагает искать систему эффективных признаков в рамках корреляционной теории, целесообразно определить автокорреляционную функцию $R_{yy}(\tau)$ выходного процесса $y(t)$. Корреляционные функции выходных сигналов линейных систем могут быть определены из общего выражения, связывающего корреляционную функцию $R_{yy}(\tau)$ выходного сигнала $y(t)$ и корреляционную функцию $R_{xx}(\tau)$ входного сигнала $x(t)$. Учитывая, что в данном случае входной сигнал $x(t)$ – “белый шум”, для линейных систем с постоянными параметрами можно определить корреляционную функцию на выходе системы с точностью до постоянного множителя по её импульсной характеристике [2]:

$$R_{yy}(\tau) = G_0 \int_{-\infty}^{\infty} h(s)h(s + \tau) ds,$$

где G_0 – постоянный коэффициент (спектральная плотность мощности шума в заданной полосе), $h(\tau)$ – импульсная характеристика диагностируемой линейной системы.

При моделировании данного метода измерения корреляционной функции R_{yy} в системе Matlab 7.5 среднее квадратическое отклонение погрешности измерения не превышает 3% при отношении сигнал/шум на входе 40 дБ (рис. 2).

Таким образом, корреляционный метод измерения импульсной характеристики линейной системы позволяет получать результаты измерений высокой точности без отключения линейной системы из рабочего режима при отношении сигнал/шум $\sim 40 \div 60$ дБ на входе.

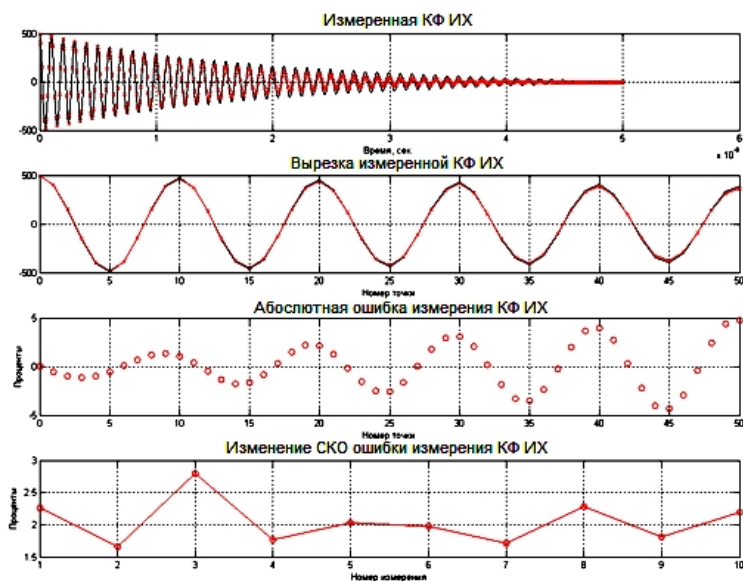


Рис. 2. Графики измерений корреляционной функции импульсной характеристики (добротность 170, усреднение по 500 реализациям)

При построении системы диагностики в качестве моделей сигналов, действующих на выходе исследуемого линейного тракта, предложено использовать нормальные случайные процессы с экспоненциально-косинусной автокорреляционной функцией [2]. Такие процессы характерны для линейных систем второго и более высоких порядков. Нарушения в работе избирательных систем, связанные с изменением по различным причинам (температура, влажность и т.д.) номиналов элементов данной системы, зачастую приводят к ухудшению избирательных свойств системы: расширению полосы пропускания, уменьшению крутизны склонов амплитудно-частотной характеристики, уменьшению отношения сигнал/шум на выходе системы и т.д.

Параметр, наиболее ёмко описывающий данный класс нарушений в работе избирательной системы, – это эквивалентная добротность. Поэтому в качестве диагностически значимого параметра была выбрана эквивалентная добротность. В качестве анализируемого тракта принят резонансный усилитель промежуточной частоты, настроенный на 10 МГц. Шунтирующее сопротивление колебательного контура изменялось на 10%. Сформировано 4 класса состояния данной линейной системы. Эквивалентные добротности для каждого класса: 1) $Q_{\text{экв}}=170$; 2) $Q_{\text{экв}}=153$; 3) $Q_{\text{экв}}=138$; 4) $Q_{\text{экв}}=123$. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) по классам приведены на рис. 3.

Любые изменения номиналов элементов диагностируемой системы непосредственно отражаются на форме АКФ, поэтому в качестве вектора признаков используется вектор отсчётных значений корреляционной функции процессов на выходе модели линейной системы:

$$R_{yy}(nT_0) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} h(iT_0)h[(i+n)T_0], \quad (3)$$

где N – количество отсчётных значений $h(t)$ импульсной характеристики линейной системы, взятых с интервалом дискретизации T_0 .

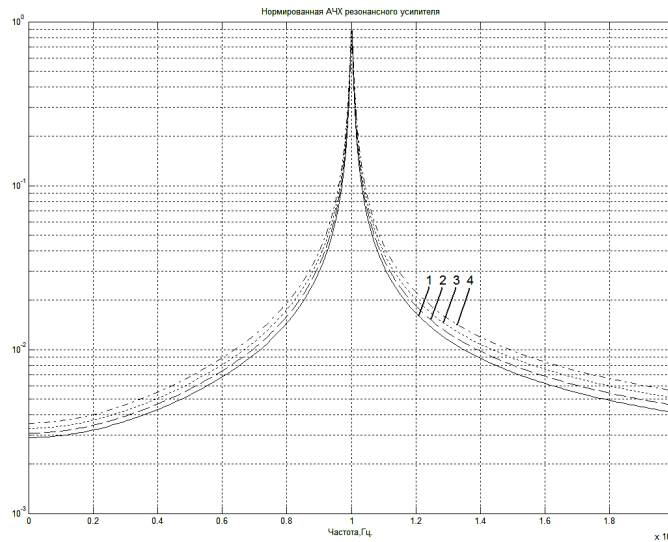


Рис. 3 Нормированные АЧХ резонансного усилителя по классам

Вследствие того, что в качестве вектора признаков используются отсчётные значения автокорреляционной функции нормального случайного процесса, прошедшего через узкополосную линейную систему, принято целесообразным выбрать решающее правило, эквивалентное байесовскому решающему правилу, построенному на основании критерия минимума расстояния в виде [4]

$$d_i(\vec{x}) = \ln p(\omega_i) - \frac{1}{2} \ln |C_i| - \frac{1}{2} [(\vec{x} - \vec{m}_i)' C_i^{-1} (\vec{x} - \vec{m}_i)], \quad (4)$$

где $i=1,2,\dots,M$, C_i , \vec{m}_i – ковариационная матрица и вектор математического ожидания образов i -го класса; M – число классов образов; $|C_i|$ – определитель ковариационной матрицы [4]. Причём образ \vec{x} зачисляется в класс ω_i , если для него выполняется условие $d_i(\vec{x}) > d_j(\vec{x})$ при всех $j \neq i$. Для реализации решающей функции необходимо для каждого класса хранить вектор средних, ковариационную матрицу, скаляр.

Для сравнения проведено исследование непараметрического классификатора, работающего по методу гиперсфер [5], когда разделяющая поверхность формируется как огибающая гиперсфер в пространстве эффективных признаков. Поверхности элементарных фигур в виде гиперсфер записываются в виде [5]

$$\sum_{i=1}^n (\vec{r}_i^* - m_{ij}^*)^2 - (R_j^*)^2 = 0, \quad (5)$$

где \vec{r}_i^* – значение оценки признака при i -м опорном распределении ($i=1,2,\dots,K$), m_{ij}^* – оценка математического ожидания признака при i -м опорном распределении для j -го эталона ($j=1,2,\dots,M$), R_j^* – оценка радиуса гиперсферы.

Необходимыми параметрами для описания собственной области G являются координаты центра сферы m_G и величина радиуса R . Эти величины получают при обучении устройства распознавания. Объем собственной области класса определяется минимальным радиусом $R_{i \min}$, при этом решающее правило может быть осно-

вано на попадании (или непопадании) распознаваемого сигнала внутрь собственной области класса, охваченной радиусом $R_i \min$, и выглядит следующим образом [5]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (\bar{r}_i^* - m_{ij}^*)^2 - (R_{j \min}^*)^2 \leq 0, x(t) \in \omega_j; \\ \sum_{i=1}^n (\bar{r}_i^* - m_{ij}^*)^2 - (R_{j \min}^*)^2 > 0, x(t) \notin \omega_j. \end{cases} \quad (6)$$

В результате усреднения оценок R^* (величина R_j является случайной и распределена нормально) получаем [5]

$$(L_j^*) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\sum_{i=1}^K (r_i^* - m_{ij}^*)^2 \right], \quad (7)$$

где K – размерность признакового пространства; N – количество оценок r_i^* , полученных при обучении. Приблизительно (с ошибкой 1%) можно определить [5]

$$R_j \approx 3L_j^*. \quad (8)$$

Были получены оценки статистической погрешности результатов моделирования алгоритмов параметрического и непараметрического распознавания, и определены вероятности ошибок по классам. Определено понятие статистической погрешности цифрового моделирования работы рассмотренных классификаторов при решении задачи классификации случайных процессов, определены вероятности ошибок распознавания по классам (табл. 1).

Таблица 1

Параметр	Условный класс сигналов			
	1	2	3	4
$\hat{P}_{ош}$ (по Байесу)	0,05	0,09	0,1	0,08
$\hat{P}_{ош}$ (метод гиперсфер)	0,1	0,15	0,2	0,1

Произведен сравнительный анализ показателей качества предложенного параметрического и непараметрического алгоритма классификации. Были установлены теоретические пределы вероятности ошибки решающего правила по методу гиперсфер в сравнении с вероятностью ошибки Байесовского правила. Байесовская вероятность ошибки – наименьшая. Практическим неудобством в реализации Байесовского правила является то, что для достижения заданной точности классификации необходимо сохранять в памяти достаточно объемную корреляционную матрицу, что существенно сказывается на вычислительных затратах времени классификации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корн Г. Моделирование случайных процессов на аналоговых и аналого-цифровых машинах. – М.: Мир, 1968. – 315 с.
2. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 456 с.
3. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов: Пер. с англ. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 368 с.
4. Фомин В.Н. Математическая теория обучаемых опознающих систем. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. – 235 с.
5. Сенин А.Г. Распознавание случайных сигналов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1974. – 76 с.

Мирвода Денис Васильевич
Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге
E-mail: rpru@tsure.ru
347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44
Тел.: +7(8634)311626

Mirvoda Denis Vasikitvich
Taganrog Institute of Technological – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»
E-mail: rpru@tsure.ru
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia
Phone: +7(8634)311626

УДК 681.3.062

С.И.Клевцов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГРАДУИРОВКИ И ИЗМЕРЕНИЙ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ
LABVIEW В УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИНАХ**

Для обучения специалистов в области микропроцессорных систем мониторинга технических объектов разработан компьютерный лабораторный стенд. С его помощью можно моделировать процессы градуировки датчика и измерения физической величины, исследовать различные модели градуировочной характеристики датчика давления, выполнять выбор функции преобразования, наиболее подходящей для конкретного датчика. Все процедуры технологически близки к реальным процессам.

Мониторинг; датчик; функция преобразования; моделирование.

S.I.Klevtsov

**MODELLING OF GRADUATION AND MEASUREMENTS IN
INTELLECTUAL GAUGES OF PRESSURE MEANS LABVIEW IN SUBJECT
MATTERS**

The computer laboratory stand is developed for training of students in the field of microprocessor systems for monitoring. With its help it is possible to model processes of graduation of the gauge and measurement of physical size, to investigate various models of characteristics of the gauge for pressure measurement, to carry out a choice of function of the transformation most suitable to the concrete gauge. From a technology position all procedures are similar to real processes.

Monitoring; the gauge; transformation function; modeling.

При подготовке специалистов в области создания и эксплуатации распределенных микропроцессорных систем мониторинга технических объектов необходимо уделять особое внимание вопросам обучения технологии обработки поступающей с датчиков измерительной информации с помощью локальных микропроцессорных систем нижнего уровня.

В связи с трудностями экспериментальной реализации воздействия физических переменных на датчики, их градуировки и измерений, в качестве альтерна-