структурной помехи: Отчет и НИР "Автоматика" (заключительный)/ НИИ ПМК; Руководители Л.Н.Белюстина, В.П.Пономаренко; № ГР 0184.022.498; Инв. № 0285.0069161. Горький, 1985. - 118 с.

4. Белюстина Л.Н., Белых В.Н. Качественное исследование динамической системы на цилиндре //Дифференциальные уравнения. 1973. Т.9. № 3. С.403-415.

5. Белюстина Л.Н. Исследование нелинейной системы фазовой автоподстроки частоты //Радиофизика. 1959. Т.II. № 2. С.277-291.

6. Фазовая синхронизация /Под ред. В.В.Шахгильдяна, Л.Н.Белюстиной. М.:Связь, 1985. - 289 с.

УДК 378.1:681.31

Е.П.Калина, А.И.Хмельницкий

ИМИТАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ЗАДАННЫХ ОБЪЕКТОВ НА УРОВНЕ РЕАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

(г. Москва)

Имитационное моделирование объектов на уровне реальных сигналов в реальном времени, базирующееся на использовании цифровой вычислительной техники, требует анализа адекватности процесса моделирования реальному объекту с учетом конкретных параметров имитационного комплекса (ИК) и системы сбора и обработки данных (ССОД) с целью обоснованного выбора режимов работы имитационного комплекса.

Пусть ИК состоит из ЭВМ, программа в которой реализует алгоритм, "поведения" объекта в некоторой заданной области условий, и совокупности цифро-аналоговых (ЦАП) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) для сопряжения с внешней средой на уровне реальных сигналов. При проведении экспериментов с помощью автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) ССОД также имеет в своем составе ЭВМ и устройства сопряжения с объектом (УСО - например КАМАК), в число которых входят ЦАПы, АЦП и другие функциональные модули. Состояние реального объекта в произвольный момент времени для ССОД и экспериментатора представляется совокупностью измеряемых выходных сигналов объекта - вектор-функцией $\vec{y}_p(t)$. Предполагается, что ИК реализует идеальную модель объекта и, соответственно, выходные измеряемые сигналы модели представляют вектор функцию $\vec{y}(t)=\vec{\varphi}(a,t)$, где $\vec{a}\in A$, $t\in[0,T]$ и A - заданное ограниченное множество вектор-параметров, размерность вектора $\vec{y}$ равна n.

В ЭВМ ИК значения модели вычисляются для дискретных моментов времени $t_H=iH$ $i=0,1\ldots$, и выходной сигнал имеет вид

$$\vec{y}_H(t_H)=\vec{\varphi}(\vec{a},t_H).$$

Сглаживание выходного ступенчатого сигнала производится интерполирующим ЦАПом, который выполняет ступенчатую кусочно-линейную аппроксимацию сигнала. Интервал временной сетки модели кратен интервалу сетки интерполирующего ЦАПа:

$$H=kh \quad и \quad t_h=t_{Hi}+jh,\ i=0.1\ldots,\ j=0,1\ldots k$$

Будем считать, что сама модель с достаточной точностью описывает реальный объект. Однако, независимо от этого, выходной сигнал ИК содержит шумовую составляющую, обусловленную дискретностью процессов, происходящих в ИК, используемом алгоритмом восстановления и выбором параметров этих процессов.

Определим ошибку восстановления сигналов при фиксированном значении вектор-параметра $\vec{a}^*$:

$$\varepsilon(\vec{a}^*)=\varepsilon(H,h,\vec{a}^*)=\max_{\substack{i=0.1\ldots\\ j=0,1\ldots k}}\|\vec{y}_h(t_h)-\vec{\varphi}(\vec{a}^*,t_h)\|,$$

где норма понимается следующим образом:

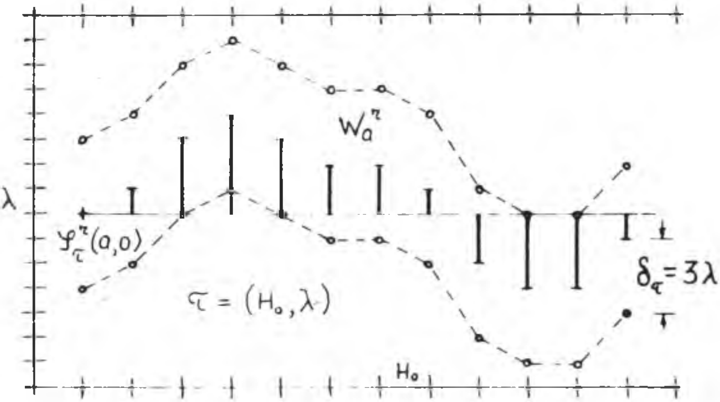
$$\|\vec{U}\|=\max_{1\leqslant i<n}|U_i|,\ где\ \vec{U}=(U_1,\ldots,U_i,\ldots,U_n).$$

С учетом аппаратных ограничений, налагаемых ИК, таких как h_a - минимально достижимый для данного типа ЦАП интервал преобразования; H_a - минимально возможный интервал сетки модели для имитации в реальном времени (с учетом сложности модели, быстродействия ЭВМ и качества программы), можно найти h и H исходя из задачи наилучшего восстановления

$$\varepsilon^*=\max_{\vec{a}^*\in A}\ \min_{\substack{h_a\leqslant h\leqslant H\\ H_a\leqslant H\leqslant H_c}}\varepsilon(H,h,\vec{a}^*), \tag{I}$$

где H_c - шаг имитации - в соответствии с теоремой Котельникова $H_c\leqslant 1/2f_c$; f_c - высшая частота ограниченного спектра сигнала.

Восстановленный таким образом сигнал $\vec{y}_h(t_h)$ (рис.I) поступает на вход ССОД, где выполняются его оцифровка и анализ состояния исследуемого процесса (объекта).



Р и с. I. Восстановление сигналов в ИК

Пусть ССОД работает с частотой опроса f_0 (соответствующий период - H_0), а разрешающая способность АЦП и соответствующий ей шаг квантования λ , тогда будем говорить, что задана сетка $\tau = (H_0, \lambda)$. Для ЭВМ ССОД сигнал $\vec{y}_h(t_h)$ определен на сетке τ и имеет вид

$$\vec{x}_\tau = \vec{x}_\tau(t, \vec{a}), \quad t = iH_0, \quad i = 0, 1 \ldots .$$

Далее решается задача оценки параметра $\vec{a}$ с учетом дискретного представления сигналов в ССОД [I] . Считая множество вектор-параметров A известным, отобразим $\vec{\varphi}(\vec{a}, t)$ для всех $\vec{a} \in A$ на τ . Получим множество цифровых значений $\vec{\varphi}_\tau(\vec{a}, t)$, которые назовем векторными цепочками: $\vec{t}_a = (t_a^1, t_a^2, \ldots, t_a^r, \ldots, t_a^n)$, причем t_a^r ("скалярная" цепочка) соответствует последовательности цифровых значений $\varphi_\tau^r(\vec{a}, t)$ и понимается как совокупность приращений (с учетом знака) значений сигнала в произвольной точке относительно начальной, т.е.

$$t_a^r = (\varphi_\tau^r(\vec{a}, H_0) - \varphi_\tau^r(\vec{a}, 0), \ldots, \varphi_\tau^r(\vec{a}, iH_0) - \varphi_\tau^r(\vec{a}, 0), \ldots, \varphi_\tau^r(\bar{a}, mH_0) - \varphi_\tau^r(\vec{a}, 0)),$$

где длина цепочки $m = INT($[illegible]$/H_0)$.

Обозначим i -ю компоненту цепочки через $\gamma^r_{a,i}$. Входная исследуемая цепочка $\vec{l_x} = (l_x^1, \dots, l_x^r, \dots, l_x^n)$ соответствует $\vec{x_\tau}(t, \vec{a})$. Введем меру близости (расстояние) скалярных цепочек

$$\rho(l_x^r, l_a^r) = \max_{1 \leqslant i \leqslant m}(\gamma^r_{a,i} - \gamma^r_{x,i}, 0) + \max_{1 \leqslant i \leqslant m}(\gamma^r_{x,i} - \gamma^r_{a,i}, 0).$$

Аналогично, меру близости векторных цепочек определим как

$$\sigma_a(\vec{l_a}, \vec{l_x}) = \max_{1 \leqslant r \leqslant n} \rho(l_x^r, l_a^r).$$

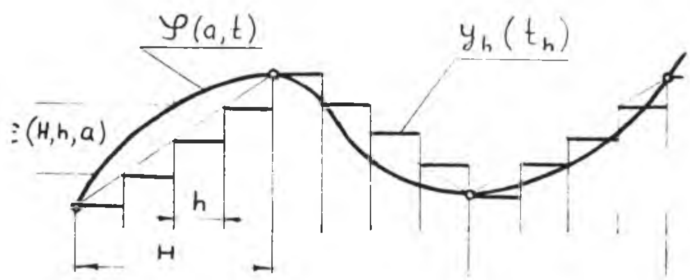
Пусть ССОД решает задачу оценки вектор-параметра модели с заданной точностью, которую конструктивно будем представлять множеством возможных решений задачи идентификации - $\Omega(\vec{a}^*)$ - оценочное множество, например,

$$\Omega(\vec{a}^*) = \{\vec{a} : \vec{a}^* - \Delta\vec{a} \leqslant \vec{a} \leqslant \vec{a}^* + \Delta\vec{a}, \vec{a} \in A\}, \qquad (2)$$

где A - конечное дискретное множество вектор-параметров.

Множеству $\Omega(\vec{a}^*)$ соответствует вполне определенный максимальный уровень сигнала шума, лежащего в спектре полезного сигнала: $\sigma = \max \sigma(t)$.

Определим допустимую величину σ в том случае, если задано оценочное множество в виде (2). Вокруг цепочки l_a^r при фиксированном σ_τ, определенном на сетке τ, построим область "размытия" W_a^r. Множество всех возможных значений сигнала при этом представлено совокупностью точек, лежащих внутри трубки диаметром σ, построенной вокруг цепочки l_a^r, т.е. внутри области размытия (рис.2). Найдем все цепочки l_a^r, для которых l_x^r принад



Р и с. 2. Цепочка l_a и ее область размытия лежит области размытия цепочек ℓ_a^r. Можно показать (см. работу [2], что $\ell_x^r \in W_a^r$ тогда и только тогда, когда $\rho(\ell_x^r, \ell_a^r) \leqslant \sigma_\tau^r$. Тогда возможным решением задачи идентификации при заданном σ_τ следует считать параметр $\vec{a}$.

Установим соответствие между $\Delta \vec{a}$ и σ_τ. Для этой цели при заданных $\Delta \vec{a}$ и $\vec{a}^*$ по значениям $\vec{\varphi}_\tau(\vec{a}^*, t)$ и зафиксированных r и σ_τ^r построим все цепочки ℓ_a^r, для которых $\vec{a} \in \Omega(\vec{a}^*)$ и $\ell_{a^*}^r \in W_a^r(\sigma_\tau^r)$, т.е. $\rho(\ell_{a^*}^r, \ell_a^r) \leqslant \sigma_\tau^r$. Множество таких вектор-параметров $\vec{a}$ обозначим $\tilde{\Omega}^r(\vec{a}^*, \sigma_\tau^r)$. Определим $\sigma_\tau^r = \sigma_\tau^r(\vec{a}^*, \Delta\vec{a})$ такое, что $\tilde{\Omega}^r(\vec{a}^*, \sigma_\tau^r) = \Omega(\vec{a}^*)$.

Найдем

$$\sigma_\tau(\vec{a}^*, \Delta\vec{a}) = \max_{1 \leqslant r \leqslant n} \sigma_\tau^r(\vec{a}^*, \Delta\vec{a}),$$

а также

$$\sigma = \sigma_\tau(\Delta\vec{a}) = \max_{\vec{a}^* \in A} \sigma_\tau(\vec{a}^*, \Delta\vec{a}). \qquad (3)$$

С помощью описанной процедуры установлено соответствие между точностью Δa и максимальным допустимым уровнем сигнала шума σ. Заметим, что σ определяется также параметрами ССОД: $\sigma = \sigma(H_0, \lambda)$.

Будем называть системы реальных и имитируемых сигналов ε - эквивалентными (для данных ИК и ССОД) тогда, когда $\varepsilon^* \leqslant \sigma$ (см. формулы (I), (2)). Таким образом, если выполнено условие эквивалентности, то для данной ССОД можно говорить об адекватности ИК реальному объекту.

Библиографический список

I. Хмельницкий А.И. Алгоритмы идентификации сложных событий при обработке экспериментальной информации в режиме реального времени//Вычислительные системы и автоматизация научных исследований. М., 1980, С.70-82.

2. Автоматизация экспериментальных исследований: Учебное пособие/Кузьмичев Д.А., Жигулев В.Н., Калина Е.П., Хмельницкий А.И. и др.-М.:МФТИ, 1982. - 76 с.