УДК 004.056.5:681.513

Informatics and Mathematical Methods in Simulation
Vol. 4 (2014), No. 4, pp. 304-311

МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА

Н.Н. Браиловский[1], **С.В. Зыбин**[1], **В.А. Хорошко**[2]

[1] Государственный университет телекоммуникаций,
ул. Соломенская,7, Киев, 03680, Украина; e-mail: duikt@ua.fm
[2] Национальный авиационный университет,
просп. Космонавта Комарова, 1, Киев, 03058, Украина; e-mail: professor_va@ukr.net

Рассматривается обобщённый подход к идентификации аппроксимируемой модели, которая может использоваться для описания эволюции системы с распределёнными параметрами. Приближенные уравнения, которые исходят из метода Галёркина, предложены для создания модели. На основе этих уравнений можно провести взаимосвязанную процедуру идентификации и изменения динамических характеристик системы.

Ключевые слова: прогнозирование, системы управления, моделирование процессов, операторы Вольтерры, аппроксимирующая модель.

Введение

Всякая математическая модель, которая используется для описания процессов, протекающих в системах обеспечения информационной безопасности (СОИБ) государства, является только его аппроксимацией. Поэтому выбор типа и структуры модели СОИБ может быть необозначенным и диктуется, в основном, стремлением к наиболее адекватному описанию процессов, протекающих в ней. Возможны различные формы описания одних и тех же процессов. При этом сохраняется полная эквивалентность результатов моделирования по входным и выходным переменным.

В управлении СОИБ часто применяется преобразованное описание, когда не только меняется структура модели, но и формы представления входных и выходных переменных. Так, для линейных динамических систем возможно как временное описание поведения изображающей точки в пространстве состояний, так и преобразованное в частотную область описание на основе передаточных функций. Когда структура модели системы выбрана и по результатам идентификационного эксперимента сделана оценка его параметров или характеристик, возникает проблема дальнейшего использования полученной модели. Обычно вначале исследуются динамические свойства системы аналитическими методами или моделированием отклика системы на различные входные воздействия. При этом в сложных случаях используют преобразования уравнений, которые описывают систему, к виду, удобному для проведения исследований и дальнейшего использования. Для этого применяются канонические представления или аппроксимирующие разложения. Обычно, для выбора обратной связи по заданному спектру в линейных стационарных СОИБ с описанием в пространстве состояний вместо матриц и векторов общего вида, определяющих динамическую модель системы, применяют нормальную или каноническую формы, их представления. Особое значение аппроксимация имеет для распределённых систем, которыми и являются СОИБ государства, описываемые уравнениями в частных производных и соответствующими краевыми и начальными условиями. Без аппроксимации практически невозможно моделировать происходящие процессы в системах. Поэтому представляется естественным идентифицировать СОИБ в классе аппроксимирующих моделей.

Цель работы

Исследование общего подхода к идентификации аппроксимирующей модели СОИБ, которая может использоваться для описания эволюции системы с распределёнными параметрами, что характерно для систем этого типа.

Основная часть

Чтобы избавиться от неоднозначности при выборе структуры модели и её возможных аппроксимаций, необходимо учитывать, прежде всего, для каких целей идентифицируется модель СОИБ. Модель, используемая для прогнозирования, может существенно отличаться от модели, предназначенной для синтеза управления системы с обратной связью. Это можно увидеть на примерах систем с распределёнными параметрами. Пусть интересующие процессы протекают на интервале времени T (конечном или бесконечном) в системе с параметрами, распределёнными в некоторой пространственной области G. И пусть эти процессы носят эволюционный характер и в классической формулировке описываются уравнениями в частных производных и некоторыми краевыми и начальными условиями. Для идентификации модели таких систем более общей является функционально-аналитическая запись структуры эволюционных уравнений. Под функционально-аналитическим описанием будем понимать задачу Коши:

$$q'(t)+\theta q(t)=f(t), t\in T, q(0)=q_0,\ q'\in(X\to X^*), \theta\in(X\to X^*), f\in X^*, \qquad (1)$$

где с помощью функции времени $q(t)$ каждому моменту времени из T ставится в соответствие функция распределения в области G [3]. Под X понимается функциональное пространство со специальной нормой, которое оператором θ отображается в сопряжённое к X пространство X^*. В общем случае θ может быть радиально непрерывным монотонным коэрцитивным оператором Вольтерры. При этом гарантируется существование и единственность решения прямой задачи (1). Функционально-аналитическая задача детально описана в [1,2]. В структуре (1) предполагается также, что граничные условия однородны. Это допустимо, ибо всегда можно указать преобразование, с помощью которого краевую задачу с неоднородными условиями можно свести к однородной. В результате $f(t)$ определяет как объёмное, так и поверхностное входное воздействие на систему. Во многих случаях оператор θ имеет вид $\theta=L^*\theta_0 L$, где L – непрерывный линейный оператор со структурой, известной из простых физических соображений, а L^* – ему сопряжённый. Кроме этих параметров, идентификации могут подлежать начальное распределение q_0, множество D, допустимыми краевыми условиями и особенностями оператора θ функций из пространства X, а также в некоторых случаях неопределённой может быть область G, на которой определяется функция q. Последнее имеет место, когда отсутствует естественная жёсткая граница области, т.е. когда она имеет размытый характер. При идентификации модели со структурой (1) достаточно предполагать, что измеряемый отклик системы на любое допустимое входное воздействие взаимно однозначный. Тогда класс включаемых в рассмотрение операторов может быть шире указанного раньше. В задачах моделирования процессов, описываемых (1), и других применениях этой модели широко используется переход к аппроксимирующим (1) приближенным уравнениям с использованием метода Галёркина [2]. В результате модель (1) является как бы промежуточной, имеющей чисто теоретическое значение. Поэтому естественным представляется подход к идентификации модели процессов, которые по своей физической природе соответствуют (1), с использованием связи аппроксимирующих моделей и, в частности, её структуры, вытекающей из метода Галёркина. Пусть $\{h_1, h_2, \ldots\}$ – какая-либо полная система линейно независимых элементов, взятых из множества функций области определения оператора (определяемой, главным образом, краевыми условиями). Это множество, в свою очередь, принадлежит некоторому пространству функций положения H, являющимся, гильбертовым пространством. Этому же пространству H принадлежит и функция q_0, определяющая начальное состояние системы. Пусть H_n – линейная оболочка множества $\{h_1, h_2, \ldots\}$, наделённая скалярным произведением, индуцированным из H. Будем считать H_n и ему сопряжённое H_n^* отождествлёнными. Соответственно определяются X_n и X_n^*, а скалярное произведение элементов $f \in X_n^*$ и $q \in X_n$ задаётся выражением $\int_T [f(t), q(t)] dt = \langle f, q \rangle$, где интегрирование понимается по Бохнеру [3]. Каждому оператору θ устанавливается соответствие с оператором $\theta_n \in (X_n \to X_n^*)$ по правилу $\langle \theta_n q, v \rangle = \langle \theta q, v \rangle, \forall v \in X_n$, и аналогичное соотношение для $f_n \in X_n^*$ примет вид: $\langle f_n, v \rangle = \langle f, n \rangle, \forall v \in X_n$. Тогда для любой последовательности $\{q_{0n}\} \in H_n$, сходящейся в H к q_0, решение уравнения Галёркина

$$q'_n + \theta_n q_n = f_{n1} q_n(0) = q_{0n}, q_n \in X_n \tag{2}$$

обладает следующими свойствами. На множестве всех непрерывных функций $C(T, H)$ решение q_n при $n \to \infty$ сходится к решению задачи (1), а на X гарантируется слабая сходимость q_n к q. Таким образом, когда задача (1) разрешима, уравнения Галёркина при достаточно больших n хорошо аппроксимируют процессы, протекающие в рассматриваемом классе систем [4]. Если оператор θ задан с помощью семейства операторов $\{\theta(t)\}$, т.е. $(\theta_q)(t) = \theta(t) q(t)$, то задача (2) представляет собой задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Здесь (θ_q) обозначает функцию с обычным применением оператора θ для фиксированного времени. Операторы Вольтерры, характеризующиеся предысторией, не допускают такого локального представления. Уравнение Галёркина в случае семейства операторов можно записать в виде

$$\langle q' n(t) + \theta(t) \cdot q_n(t), h_i \rangle = \langle f, h_i \rangle, i = \overline{1, n}. \tag{3}$$

Кроме функционально-аналитической формулировки задачи Коши в виде (1), существуют и другие типы задач, характерные для систем с распределёнными параметрами. Рассмотрим некоторые из них. Пусть имеется гильбертово пространство H для семейства: $M = \{M(t)\}, t \in T$ и $\theta = \{\theta(t)\}, t \in T$, операторов из $H \to H^*$ и функция $f \in T \to H^*$. Тогда можно сформулировать два типа задач, известных как псевдопараболические дифференциальные уравнение, называемые также уравнениями Соболева – Гальперна [2]. Первый тип имеет вид

$$M(t)q'(t) + \theta(t)q(t) = f(t), \forall t \in T \tag{4}$$

с начальным условием $q(0) = q_0$, а второй тип уравнений –

$$\left[M(t)q(t)\right]' + \theta(t)q(t) = f(t), \forall \in T \tag{5}$$

с начальным условием $M(0)q(0) = m_0, m_0 \in H^*$.

Структуры уравнений (4) и (5) характерны для различных задач механики сплошной среды. При рассмотрении волновых процессов (электрические и электромагнитные волны) в нелинейных средах может использоваться функционально-аналитическая формулировка модели:

$$q''(t) + M(t)q'(t) + \theta(t)q(t) = f(t), \forall t \in T \tag{6}$$

с начальными условиями $q(0) = q_0$, $q'(0) = q_1$. Обычно при этом рассматривают гильбертово пространство H и непрерывное плотно вложенное в H рефлексивное банахово пространство V [4]. Под M и θ понимается семейство операторов $M = \{M(t)\}, t \in T$ и $\theta = \{\theta(t)\}, t \in T$, действующих из V в V'. Для остальных функций в выражении (6) имеем: $f \in (T \to V^*), q \in (T \to V), q' \in (T \to V)$ и $q'' \in (T \to V^*)$.

Вместо семейств операторов $\{M(t)\}$ и $\{\theta(t)\}$, которые записаны в (4) – (6), могут рассматриваться более общие операторы – M и θ, в том числе операторы Вольтерры. При этом все указанные выше формулировки задач удовлетворяют условиям разрешимости при достаточно общих предположениях о свойствах операторов и множеств, на которых они действуют. Кроме того, сходимость галёркинских приближений к решениям соответствующих приведённых уравнений. Если, используя базис $\{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ конечномерного подпространства $H_n \subset H$, представить галёркинские приближения в виде

$$q_n(t) = \sum_{k=1}^{n} x_k(t)h_k, t \in T, \tag{7}$$

то уравнения Галёркина оказываются системой, вообще говоря, нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений относительно временных функций $\{x_k(t)\}, k = \overline{1,n}$. Далее рассмотрим вопрос использования для целевой идентификации структуры модели рассматриваемых процессов в форме приближенных уравнений Галёркина[3].

Рассмотрим подробнее вопрос, в каких случаях модели, основанные на приближенных уравнениях Галёркина, могут использоваться при идентификации систем с распределёнными параметрами. Для этого необходимо определиться с входным воздействием на систему и определяется выходом, с помощью которого осуществляется наблюдение за процессами, протекающими в системе. При выборе структуры уравнений (1) и (4) – (6) отмечалось, что краевые условия, определяющие множество допустимых функций положения, предполагались однородными, что вполне допустимо и не ограничивает общности, поскольку, как указывалось, всякое граничное воздействие можно привести к воздействию $f(t)$, стоящему в правой части операторных уравнений. Число внешних управляемых воздействий на систему, как правило, конечно и в большинстве случаев может быть представлено в виде

$f(t)=\sum_{j=1}^{r}U_j(t)f_j$, где $U_j(t)$ – функция времени; f_j – функция положения из соответствующего пространства. Тогда имеем

$$\langle f,h_i\rangle=\sum_{j=1}^{r}b_{ij}u_j(t)=b_i^T u(t),\ i=\overline{1,n}, \tag{8}$$

где b_i и $u(t)$ – векторы размерности r, причём вектор b_i – с постоянными коэффициентами. Таким образом, в уравнениях Галёркина входное воздействие на систему принимает стандартное представление как произведение матрицы с постоянными коэффициентами на вектор входных переменных u. Наблюдаемый выход системы определяется определениями, осуществляемыми в процессе функционирования системы. Из практических соображений ясно, что каналов контроля всегда конечное число, которое может быть и достаточно большим. Контроль или определения могут быть локальными, когда элементы системы контроля расположены в точках области G, занимаемой системой, или интегральными, когда определяются интегрированные по линиям, поверхностям или участкам области G значения наблюдаемых параметров системы. В любом из этих указанных случаев веток контроля y в галёркинском приближении будет иметь структуру

$$y=g(x,t)+\xi, \tag{9}$$

которая в линейном случае также принимает стандартны вид

$$y=Cx+\xi, \tag{10}$$

где x – вектор, составленный из амплитуд x_k, разложенный (7), ξ – вектор аддитивных помех в каналах контроля. Матрица C в реальных ситуациях, в основном, постоянная. Уравнения Галёркина (2) и (3) или аналогичные им, записанные для операторных уравнений (4) – (6), совместно с (7) и (8) – (10) образуют аппроксимирующую модель рассматриваемых процессов в системах с распределёнными параметрами. Данная модель обладает тем свойством, что её решения при $n\to\infty$ сходятся к решениям точных уравнений. Кроме того, при решении задачи идентификации в такой постановке могут использоваться существующие методы и алгоритмы. Идентификационный эксперимент должен быть спланирован и поставлен таким образом, чтобы установить структуру оператора θ_n (2), оценить его параметры, идентифицировать матрицу $B=[b_1,b_2,\ldots,b_n]$ и вектор – функцию $g(x,t)$ в (9) или матрицу C в (10). Этим полностью определяются динамические свойства и параметры системы. Для нахождения характеристики, определяющих пространственную структуру СОИБ в рамках галёркинского приближения, необходимо по местоположению контролирующих приборов и особенностям интегрального контроля записать соотношения между функциями $g(x,t)$ в (9) или элементами матрицы C в (10) со значениями $\{h_1,h_2,\ldots,h_n\}$ в точках области или их интегралами. Полученные в результате выражения служат для восстановления функции h_i. Эта задача, по сути, близка к задаче аппроксимации функций, заданных дискретно. Поскольку она относится к некорректно поставленной задаче и для её решения следует применять регуляризирующие алгоритмы. Пространственная структура и число независимых изменений должны удовлетворять информационной достаточности для идентификации функций h_i. После решения задачи восстановления базисных функций

$h_i, i=\overline{1,n}$, появляется возможность восстановить границу области, где протекают процессы, и краевые условия, которым удовлетворяет всякое решение и, соответственно, все элементы h_i. Для этого необходимо построить изоповерхности, на которых $h_i = const$ и $\frac{\partial h_i}{\partial v_j} = const, h_i = \overline{1,n}, v_j$ – нормаль к j-й поверхности. Та поверхность, на которой удаётся получить однородные краевые условия, удовлетворяемые всеми базисными функциями, и будет границей Γ области G. Математически задачу о нахождении границы Γ и краевых условий на ней можно поставить строго и разработать соответствующий алгоритм её решения. Однако, как указывалось в [3], её дальнейшее практическое использование возможно только через аппроксимирующие модели. Остановимся теперь на некоторых особенностях такого подхода к идентификации систем с распределёнными параметрами, прежде всего на вопросе информационной достаточности. Для восстановления базисных функций, которые определяют пространственную структуру СОИБ, необходимо, чтобы, во-первых, размерность вектора y была достаточно большой, а, во-вторых, контроль должен распределяться по всей области и, по возможности, с учётом неоднородности. Элементы контроля должны размещаться в гуще, где предполагается неоднородность больше[5]. В результате размерность вектора y оказывается больше n, т.е. числа базисных элементов галёркинского разложения. При уравнении их размерностей задача восстановления h_i для больших номеров становится некорректно поставленной. Действительно, для восстановления таких элементов необходимо высокое пространственное разрешение. Информативность входного воздействия для идентификации обыкновенных дифференциальных уравнений динамики определяется известными результатами теории идентификации динамических систем [1,3]. Самостоятельный интерес представляют случаи, когда в силу разных обстоятельств ограничиваются идентификацией только динамической части модели, т.е. базисные элементы h_i не восстанавливаются и соответственно не могут быть определены другие пространственные характеристики системы.

Пусть оператор θ в (1) и операторы M, θ в (4) – (6) – линейны и их параметры стационарны, контролируемые параметры также линейны и представлены выражением (10) для галёркинского разложения. Рассмотрим для простоты случай с одним входом в (8) и одним выходом в (10). Тогда уравнения Галёркина примут вид:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + bu, \\ y &= c^T x + \xi, \end{aligned} \tag{11}$$

где матрица A и векторы b, c имеют размерность $n \to \infty$. Поэтому для любого конечного n правые части обоих уравнений должны содержать дополнительные члены, соответствующие немоделируемой (11) динамике системы. При решении задач управления возникает естественный вопрос, каково должно быть соотношение между детерминированной частью системы, определяемой (11), и её неопределённой частью. Другими словами, каким следует выбирать порядок n аппроксимирующей модели. Очевидно, в конкретных задачах его значение может быть различным. Следовательно, при построении аппроксимирующей модели (11) процедура идентификации должна включать поиск подходящей структуры. В данной статье развивается методология, предусматривающая такую ориентированную на управление идентификацию. Её схема состоит из идентификации и синтеза управления, для последовательности субмоделей. Начнём с того, что с помощью неособого преобразования приведём систему (11) к канонической форме Лурье с жордановой формой матрицы A. В результате получаем:

$$\dot{x}_1 = J_1 x_1 + b_1 u,$$

$$\dots$$

$$\dot{x}_p = J_p x_p + b_p u, \tag{12}$$

$$y = \sum_{j=1}^{p} y_j x_j^T = \left(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{ji}, \dots, x_{jm_j}\right),$$

$$y_j = C_j^T x_j,\ C_j^T = \left(C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jm_j}\right), b_j^T = (0,0,\dots,1),$$

вектор-строка размерности

$$m_j, \sum_{j=1}^{p} m_j = n,$$

$$J_j = \begin{bmatrix} \lambda_j & 1 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_j & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_j \end{bmatrix}$$ - жорданова клетка.

Преобразование P, с помощью которого осуществляется переход от (11) к (12), означает не что иное, как замену базиса $h^T = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ конечного пространства H_n на новый $h^{*T} = \{h_1^*, h_2^*, \dots, h_n^*\}$. Действительно, $q_n(t) = h^T x(t) = h^T P x^*(t)$, где $x^{*T}(t) = \left(x_1^T, x_2^T, \dots, x_p^T\right) h^* = P^T h.$

Новая система функций положения h^* галёркинского разложения, является нормированным по входу квазиортогональным базисом. Для простых собственных значений базис будет строго ортогональным. Вторая каноническая форма представления системы соответствует нормированному по выходу квазиортогональному базису. В дальнейшем предполагаем, что все собственные значения λ_j действительные, что оправдано для операторов θ параболического или квазипараболического типов. Применяемый подход легко обобщить и на случай с комплекснозначными λ_j. Группа уравнений, соответствующая каждой жордановой клетке, рассматривается как субмодель системы, которая играет ключевую роль в развиваемом подходе к совместной идентификации и синтезе управления. Предполагается осуществить итерационный синтез обратной связи по идентифицированной субмодели с наименьшим собственным значением. Не нарушая общности, можно считать, что это значение принадлежит первому блоку.

Выводы

Предлагаемый подход, в котором идентификация модели и синтез стабилизирующей обратной связи рассматривается взаимосвязано как унифицированный итерационный процесс, может служить основой для создания методик проектирования систем обеспечения информационной безопасности с управлением как любого объекта, так и государства. Его главное преимущество в том, что указана последовательность достаточно простых операций, приводящих от экспериментальных наблюдений за системой к приемлемым с практической точки зрения структуре и параметрам системы. Описанная методика удовлетворительно аппроксимируется линейными динамическими уравнениями высокого порядка. Основная трудность описанного подхода состоит в том, как правильно обосновать и определить порядок субмодели.

Список литературы

1. Баранов, В.Л. Відновлення та оптимізація інформації в системах прийняття рішень / В.Л. Баранов, М.М. Браіловський, А.А. Засядько, Н.Ф. Казакова, В.О. Хорошко. – К: Вид. ДУІКТ, 2009. – 134с.
2. Гаевский, Х. Нелинейные операторные уравнения и операторные дифференциальные уравнения / Х. Гаевский, К. Грегер, К. Захариас – М: Мир, 1978. – 336с.
3. Баранов, В.Л. Моделювання фізичних процесів в інформаційній безпеці / В.Л. Баранов, М.В. Капустян, Р.М. Костюченко, В.О. Хорошко. – К: Вид. ДУІКТ, 2009. – 175с.
4. Гиг Дж Ван. Прикладная общая теория систем: в 2-х томах / Гиг Дж Ван. – М: Мир, 1981. – 733 с.
5. Губарев, В.Ф. Оценивание векторов состояния динамических систем в условиях неопределённости / В.Ф. Губарев // Проблемы управления и информатики. – 1996. – № 1-2. – С. 91-100.

МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ В СИСТЕМАХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ДЕРЖАВИ

М.М. Браіловський[1], С.В. Зибін[1], В.О. Хорошко[2]

[1] Державний університет телекомунікацій,
вул. Соломянськая,7, Київ, 03110, Україна; e-mail: duikt@ua.fm
[2] Національний авіаційний університет,
просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, 03058, Україна; e-mail: professor_va@ukr.net

Розглядається загальний підхід до ідентифікації апроксимуючої моделі, що може використовуючись для опису еволюції системи з розподіленими параметрами. Наближені рівняння, що виходять з методу Гальоркіна, запропоновані для утворення моделі. На основі цих рівнянь можна провести взаємозв'язану процедуру ідентифікації і зміну динамічних характеристик системи.

Ключові слова: прогнозування, системи керування, моделювання процесів, оператори Вольтерри, апроксимуюча модель.

CONTROL MODELS IN STATE INFORMATION SECURITY SYSTEMS

N.N. Brailovsky[1], S.V. Zybin[1], V.A. Khoroshko[2]

[1]State University of Telecommunications
7, Solomyanska Str., Kyiv, 03110, Ukraine; e-mail: duikt@ua.fm
[2]National Aviation University,
1, Kosmonavta Komarova ave., Kyiv, 03058, Ukraine; e-mail: professor_va@ukr.net

We discuss a generalized approach to the identification of approximation model that can be used to define the evolution of a distributed parameter system. The approximate equations generated by Galerkin's method are proposed to develop the model. Based on these equations, one may perform interrelated procedures to identify the model and to change the system dynamics.

Keywords: prediction, control systems, process modeling, Volterra operators, approximation model.