УДК 519.711 Н. Д. Кошевой, А.Н.Сильвестров

Две стратегии идентификации реальных объектов

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Национальный технический университет Украины «КПИ»

Введение и постановка задачи. Возникновение теории идентификации как математической формализации причинно-следственных связей в объектах реального мира теряется в глубине веков. Пик развития ее относится ко второй половине XX века – периоду появления и быстрого развития средств компьютеризации и автоматизации экспериментальных исследований.

Однако и сейчас нельзя утверждать, что эта теория сформировалась и является достаточно корректной. Для объектов реального мира характерны бесконечномерность, всеобщая взаимосвязь переменных и, как следствие, отсутствие статики, линейности взаимосвязей (коэффициенты взаимосвязи, будучи материальными, тоже изменяются), автономности (изолированности) и т.д. Закономерность f_∞, связывающая бесконечномерный вектор состояния $\dot{X}_\infty$, возможно, и постоянна, но непознаваема:

$$\dot{X}_\infty = f_\infty\left(X_\infty\right). \tag{1}$$

Ограничивая пространственно-временную область G_∞ изменения X_∞ достаточно малой областью G, рассматривают лишь его проекцию на n координат

$$\dot{X} = f\left(X\right), \tag{2}$$

где вектор-функция $X\left(t\right)$ – n- мерная вектор-функция времени t.

Продолжая сужение области G, с определенной степенью точности ε переходим к линейной стационарной модели

$$\Delta\dot{X} = A\Delta X + B\Delta U , \tag{3}$$

где переменные реального объекта разделены на причинные U и следственные X и взяты в отклонениях $\Delta X, \Delta U$ от некоторого центра $\left(X_0, U_0\right)$ области G.

Другой способ связывает оператором W непосредственно условно принятые вход ΔU и выход ΔY объекта

$$\Delta Y = W \cdot \Delta U , \tag{4}$$

где $\Delta Y, \Delta U$ и W могут быть функциями времени (W – интеграл свертки) или изображениями по Лапласу (W – передаточная функция).

Неучтенное подмножество $\left(X_\infty - X\right)$ переменных реального мира создает приближенность моделей (3), (4). Погрешность ε стремится к нулю лишь при сужении области G в точку. Но при этом исчезает необходимая для нахождения A, B или W по $\Delta X\left(t\right)$, $\Delta U\left(t\right)$, $\Delta Y\left(t\right)$ информация. Таким образом, модели (2), (3), (4) в принципе не могут быть точными: при малых выборках влияют быстро (относительно X, U) меняющиеся составляющие отброшенного подмножества

$(X_\infty - X)$, воспринимаемые как случайный процесс $N_1(t)$; при больших – предельная теорема Чебышева не работает вследствие влияния медленно меняющихся составляющих $N_2(t)$ этого подмножества, вносящих нестационарность в усредненные характеристики случайного процесса.

Учитывая приведенное выше, будем различать два существенно различных подхода к задаче идентификации:

первый подход - **сигнальная идентификация**, когда для заданного множества входных сигналов $U(t)$ необходимо подобрать такое отображение $U(t)$ в $Y(t)$, чтобы некоторая норма ошибки ε была меньше заданной Δ:

$$\|\varepsilon\| < \Delta, \tag{5}$$

т.е. сигнал $Y(t)$ аппроксимируется с точностью до Δ в базисе $W_i(U(t))$ преобразованных операторами W_i сигналов $U(t)$;

второй – **параметрическая идентификация**, когда на множестве сигналов ΔU, ΔX или ΔY необходимо, кроме условия (5), определить (усредненную по области G или конкретные для заданной точки (X_0, U_0, t_0) этой области) структуру и параметры матриц A, B модели (3) или оператора W модели (4).

Сигнальная идентификация должна применяться при целеориентации абстрактных моделей на задачи управления и прогнозирования, **параметрическая** – для диагностики и контроля конкретных параметров реального объекта.

Основные материалы исследования

Сигнальная идентификация и двукратная инвариантность адаптивного управления реальными объектами. Представим в ограниченной области G модель реального объекта, например аэродинамику летательного аппарата (ЛА), в следующем виде:

$$\Delta Y = W \cdot \Delta U + W_1 \cdot \Delta F + W_2 \cdot \Delta N, \tag{6}$$

где ΔF – вектор контролируемых возмущений; $\Delta N = N_1 + N_2$ – вектор неконтролируемых возмущений; W, W_1, W_2 – соответствующие операторы.

Требуется построить инвариантный к $\Delta F(t)$, оптимальный в смысле квадратичного функционала $I_1(\varepsilon, \Delta U)$ регулятор

$$\Delta U(t) = W_p(\varepsilon(t, \beta)), \tag{7}$$

где β – вектор параметров операторов W и W_1.

Ошибка $\varepsilon(t)$ в (7)

$$\varepsilon(t) = \Delta Y^*(t) - \Delta Y(t), \tag{8}$$

где ΔY^* – заданная оптимальная траектория движения ЛА.

При отсутствии ограничений оператор W_p линейный [1]:

$$\Delta U(t) = W_{p1} \cdot \varepsilon(t) + W_{p2} \cdot \Delta F(t). \quad (9)$$

Подставим выражение (9) в (6):

$$\Delta Y(t) = W \cdot \left[W_{p1} \cdot \left(\Delta Y^*(t) - \Delta Y(t) \right) + W_{p2} \cdot \Delta F(t) \right] + W_{p1} \cdot \Delta F(t) + W_2 \cdot \Delta N(t), \quad (10)$$

или: $$\Delta Y(t) = \left(W \cdot W_{p1} + I \right)^{-1} \cdot \left[W \cdot W_{p1} \cdot \Delta Y^*(t) + \left(W \cdot W_{p2} + W_1 \right) \cdot \Delta F(t) + W_2 \cdot \Delta N(t) \right]. \quad (11)$$

Условие инвариантности к контролируемому возмущению $\Delta F(t)$

$$W_{p2} = W^{-1} \cdot W_1, \quad (12)$$

где W и W_1 – неизвестные операторы модели (6) объекта.

Для оценивания W и W_1 введем модель

$$\Delta \hat{Y} = \hat{W}\left(\hat{\beta}\right) \cdot \Delta U + \hat{W}_1\left(\hat{\beta}\right) \cdot \Delta F, \quad (13)$$

вектор $\hat{\beta}$ параметров которой оценивают из условий некоторого минимума показателя I_2:

$$I_2\left(\hat{\beta}\right) = \left\| \Delta Y(t) - \Delta \hat{Y}\left(\hat{\beta}, t\right) \right\|. \quad (14)$$

В данном случае имеет место **сигнальная** идентификация: чем оперативнее оптимизируется из условия минимума I_2 вектор $\hat{\beta}$ параметров оператора $\hat{W}$ и $\hat{W}_1$ и чем полнее они (шире базис $W_i\left(\hat{\beta}\right)$, аппроксимирующий эти операторы), тем ближе $\Delta \hat{Y}$ к ΔY. При этом косвенно (с помощью оперативной подстройки $\hat{\beta}$) компенсируется влияние неконтролируемых медленных возмущений $N_2(t)$. В асимптотике система обладает двукратной [2] инвариатностью: к изменению параметров объекта, к контролируемым ΔF и низкочастотным неконтролируемым N_1 возмущениям. Высокочастотная составляющая N_2 возмущений, как правило, сглаживается естественной инерционностью ЛА, но влияет на время идентификации модели (13). Сложность структуры модели (13) адаптируется к темпу нестационарности характеристик случайного процесса $N(t)$. Здесь целесообразно применять ортогональный базис или нониусный подход [3] для адаптации размерности вектора $\hat{\beta}$ к указанной нестационарности.

Теоретически крайними в ряду сложности являются:

- простейшая нестационарная модель $\Delta \hat{Y} = \hat{\beta}(t) \cdot \Delta U$, где $\hat{\beta}(t)$ изменяется в темпе процессов $\Delta Y(t)$, $\Delta U(t)$, обеспечивая близость $\Delta \hat{Y}$ к ΔY объекта (параметрическая следящая система);
- гипотетическая сложнейшая стационарная модель (1).

Практически имеют место модели (13), усложнение которых должно способствовать повышению точности (14) и квазистационарности вектора $\hat{\beta}$ их параметров и, как следствие, оптимальности управления объектом. Учет физических процессов в объекте не обязателен, оценка $\hat{\beta}$ может не иметь физического смысла, строгая выпуклость и унимодальность показателя (14) как функции $\hat{\beta}$ не обязательна.

Параметрическая идентификация – оценивание аэродинамических коэффициентов ЛА. Здесь необходимо максимально учесть «физику» процессов в ЛА при выборе структуры нелинейности f в (2), матриц *A, B* в (3) или оператора W в (4). Помним, что модели (3) и (4) являются линеаризацией модели (2). Линеаризация допустима в силу гладкости нелинейности f (в природе в силу ограниченной мощности систем идеальные скачки отсутствуют). Для однозначности и объективности оценки $\hat{\beta}$ физических параметров β объекта, например ЛА, необходимо планированием натурного эксперимента обеспечить строгую выпуклость показателя (14) и по возможности автономность к неучтенному подмножеству $\left(X_\infty - X\right)$ переменных. Желательно также, чтобы оценка $\hat{\beta}$ линейно входила в выражение ошибки (8), а n ее компонентов $\hat{\beta}_i\left(i=\overline{1,n}\right)$были коэффициентами при линейно независимых функциях чувствительности ошибки (8) по $\hat{\beta}_i$. Тогда задача оценивания $\hat{\beta}$ сводится к минимизации строго выпуклого квадратичного показателя (14). Оценка единственна, а при соответствующих подходах [4] статистически несмещенная и эффективная.

И все же остается ее методическое смещение вследствие приближенности моделей (2), (3), (4). Приближенность стремится к нулю, когда область G изменения переменных стягивается в точку $\left(X_0, U_0, t_0\right)$. Однако с уменьшением $\Delta X,\ \Delta U$ возрастает соотношение «шум $N(t)$– сигнал $\Delta X(t)$». Это приводит к потере эффективности оценки $\hat{\beta}$. В работе [5] предложен метод, позволяющий получить методически несмещенную и достаточно эффективную оценку $\hat{\beta}$ в точке $\left(X_0, U_0, t_0\right)$. Для этого выполняют последовательный ряд однотипных (но различных по амплитуде отклонений ΔX) активных экспериментов на объекте, каждый из которых обеспечивает выпуклость показателя (14) для линейного базиса модели. Находят методически смещенные, но достаточно эффективные оценки $\hat{\beta}$. Несмещенную оценку определяют по регрессионной зависимости $\hat{\beta}\left(\|\Delta X\|\right)$, построенной для каждого $\hat{\beta}_i$ на множестве амплитуд $\|\Delta X\|$ и взятой в точке, где $\|\Delta X\|$ равна нулю [6].

Пример. В продольном короткопериодическом движении самолета М-17 выполнен ряд «перекладок» руля высоты разной амплитуды. Для каждой «перекладки» оценивали коэффициенты матриц *A, B* модели (3), являющиеся аэродинамическими; по ним рассчитывали физический параметр самолета – нормированное расстояние σ_n между центром масс и аэродинамическим фокусом самолета М-17 – запас устойчивости по вертикальной перегрузке ЛА. В таблице приведены значения амплитуды $\|\Delta\alpha\|$ отклонений угла атаки α и соответствующее им значение оценки $\hat{\sigma}_n$. В последнем столбике дана несмещенная оценка $\hat{\sigma}_n = 0,225$, полученная путем линейной аппроксимации табличной зависимости $\hat{\sigma}_n\left(\|\Delta\alpha\|\right)$ и расчета ее значения в точке нулевых отклонений. Простое усреднение результатов даст существенно смещенную (заниженную) оценку $\hat{\sigma}_n = 0,188$.

$\|\Delta\alpha\|$, град.	8,35	6,04	5,49	4,13	1,56	0
$\hat{\sigma}_n$	0,168	0,18	0,187	0,19	0,215	0,225

Выводы

Для корректности задачи идентификации следует строго различать **сигнальный** и **параметрический** подходы. Общность их состоит в минимизации ошибки (8); различие – в моделях (абстрактной и «физически» адекватной) и требованиях к функционалу (14) как функции оценки $\hat{\beta}$ (соответственно нестрогая и строгая выпуклость). К сожалению, в практике летных испытаний ЛА часто пользуются для оценивания параметров **сигнальной** идентификацией, закладывая в модель вида (3) априорно необъективно заданные (по расчету или результатам продувок в аэродинамической трубе) коэффициенты с последующей подстройкой их из условия не строго выпуклого функционала ошибки (8). При этом достигается кажущаяся адекватность модели (3) объекту: ошибка (8) достаточно мала, оценки $\hat{\beta}$ близки к априорным. Но последние могут существенно отличаться от истинных физических параметров, что впоследствии может привести к снижению безопасности полетов из-за неверного оценивания аэродинамических коэффициентов ЛА.

Список литературы

1. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами. − М.: Радио и связь, 1989. − 390 с.
2. Петров Б.Н. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. − М.: Машиностроение, 1972. − 259 с.
3. Адаптивные системы идентификации/Под ред. В.И. Костюка. − К.: Техніка, 1975. − 288 с.
4. Сильвестров А.Н., Чинаев П.И. Идентификация и оптимизация автоматических систем. − М.: Энергоатомиздат, 1983. − 200 с.
5. Сильвестров А.Н.. Два альтернативных подхода к задаче идентификации реальных объектов//Проблемы управления и информатики.–1996. − №6. − С. 54-65.
6. Синеглазов В.М., Сильвестров А.Н. Идентификация статических и динамических характеристик реальных объектов//Електроніка та системи управління. НАУ. 2005. − №4(6). − С. 80-87.