

УДК 621.391

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.Л. Подвальный

Воронежский государственный технический университет
Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, 14
E-mail: spodvalny@yandex.ru

Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет
Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, 14
E-mail: vgtu-aits@yandex.ru

Ключевые слова: нелинейные динамические системы, параметрическая идентификация, иерархическая структура.

Аннотация: Работа посвящена задаче адаптивной идентификации параметров нелинейных динамических систем. Построение моделей таких систем в виде сосредоточенной однокаскадной структуры, основанной на концепции «черного ящика», сталкивается с проблемой некоммутативности нелинейных и линейных динамических элементов системы. С целью повышения адекватности получаемых моделей предлагается решать задачу нелинейной идентификации на основе иерархически-модульной структуры процесса адаптации, предполагающей формирование каскадной конфигурации модели и использование вектора состояния реальной системы. Представлены результаты экспериментальной проверки нескольких вариантов каскадной конфигурации модели, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

1. Введение

Идентификация нестационарных параметров нелинейных динамических объектов является неотъемлемой частью алгоритмов современных адаптивных систем автоматического управления [1]. Расширение областей применения этих систем, в частности, использование адаптивных фильтров для компенсации нелинейных искажений в каналах телекоммуникационных систем, потребовало существенного снижения уровня ошибок идентификации [2-4]. Распространенные в настоящее время инженерные методы нелинейной идентификации, использующие общий унифицированный подход к решению этой задачи [5-8], не связанный с априорными предположениями о структуре объекта, не в состоянии обеспечить качественный скачок в улучшении точности идентификации. В связи с этим возникает предположение, что для снижения ошибок нелинейной идентификации следует отказаться от построения моделей на основе концепции «черного ящика» и осуществлять идентификацию не только по выходу объекта, но по полному вектору его состояния [9, 10]. Воспроизведение в модели внутренней структуры объекта открывает возможность организовать процесс идентификации различными способами, например, в виде иерархической структуры с параллельными вычислениями

ми. Предлагаемая работа посвящена практической проверке этого предположения для случая детерминированной идентификации.

2. Сравнительный анализ моделей нелинейной идентификации

2.1. Базовая модель с сосредоточенными характеристиками

В качестве нелинейной динамической системы рассматривался двухкаскадный объект, содержащий последовательно включенные элементы $f_1(x)$, $w_1(j\omega)$, $f_2(x_2)$, $w_2(j\omega)$, (1)-(4), рис. 1а:

$$(1) \quad f_1(x(j\omega)) = 2.5(1 - e^{-0.7x(j\omega)\text{sign}(x(j\omega))}) \cdot \text{sign}(x(j\omega));$$

$$(2) \quad y_1(j\omega) = \frac{k_1}{1 + j\omega T_1} \cdot f_1(x(j\omega));$$

$$(3) \quad f_2(y_1(j\omega)) = 1.25(1 - e^{-0.8y_1(j\omega)\text{sign}(y_1(j\omega))}) \cdot \text{sign}(y_1(j\omega));$$

$$(4) \quad y(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega T_2} \cdot f_2(y_1(j\omega)),$$

в которых $x(j\omega)$ и $y(j\omega)$ – спектры сигналов на входе и выходе объекта; $f_1(x_1)$, $f_2(x_2)$ – нелинейные звенья с нечетными характеристиками; $w_1(j\omega)$, $w_2(j\omega)$ – линейные динамические звенья первого порядка; k_1 – коэффициент передачи динамического звена $w_1(j\omega)$; T_1, T_2 – постоянные времени звеньев $w_1(j\omega)$ и $w_2(j\omega)$ соответственно.

Дискретная модель идентификации с сосредоточенными характеристиками (рис. 1б) использовала аппроксимацию нелинейности полиномом $\hat{F}(x_1)$ четвертого порядка (5) и две разностные схемы первого порядка для линейной части (6), (7):

$$(5) \quad \hat{F}(x) = \sum_{i=1}^4 h_i x \cdot |x|^{i-1} = h_1 x + h_2 x \cdot |x| + h_3 x \cdot |x|^2 + h_4 x \cdot |x|^3;$$

$$(6) \quad q(i+1) = \hat{F}(x(i)) \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_1}}) + q(i) \cdot e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_1}} \cdot \hat{k}_1;$$

$$(7) \quad y(i+1) = q(i)(1 - e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_2}}) + y(i) \cdot e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_2}},$$

где h_i , $i = \overline{1,4}$; \hat{T}_1, \hat{T}_2 , \hat{k}_1 – идентифицируемые параметры модели.

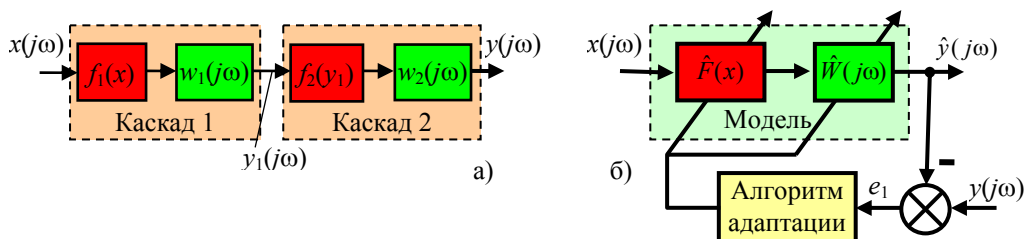


Рис. 1. Тестовый нелинейный динамический объект (а) и базовая модель (б) идентификации его параметров.

Критерием качества идентификации выбрано относительное значение среднего квадрата отклонения последовательности $\hat{y}(i)$ на выходе модели от соответствующих значений $y(i)$ на выходе реального объекта (8):

$$(8) \quad e_1(h_1, h_2, h_3, h_4, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1) = 10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^m (y(i) - \hat{y}(i))^2}{\sum_{i=1}^m y^2(i)} \right] \rightarrow \min,$$

m – объем выборки данных, используемой для идентификации, $i = \overline{1, m}$.

Минимизация функции (8) проводилась методом сопряженных градиентов и обеспечила значение критерия $e_{1, \min} = -22$ дБ. Найденное значение $e_{1, \min}$ будем использовать в качестве базы для сравнения с другими вариантами модели.

2.2. Каскадная модель системы с идентификацией по выходу

Простейшим вариантом использования априорной информации о строении объекта является воспроизведение в модели его двухкаскадной структуры, рис. 2. При этом по-прежнему будем использовать идентификацию по выходу объекта $y(i)$.

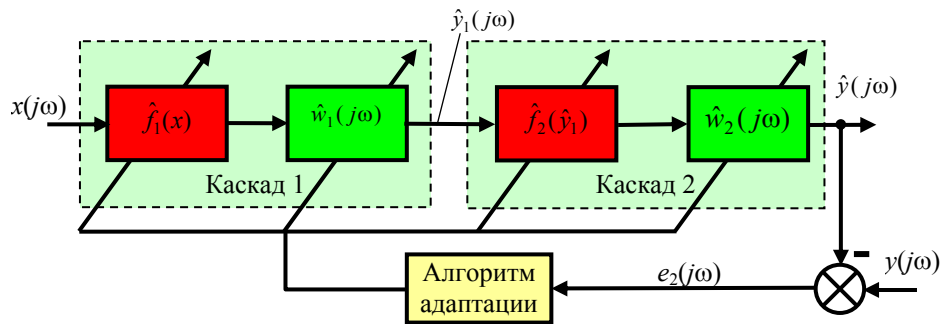


Рис. 2. Каскадная модель системы с идентификацией по выходу

Модели нелинейностей (9), (10) каждого каскада имеют второй порядок:

$$(9) \quad \hat{f}_1(x) = \sum_{i=1}^2 h_{1i} x \cdot |x|^{i-1} = h_{11} x + h_{12} x \cdot |x|,$$

$$(10) \quad \hat{f}_2(\hat{y}_1) = \sum_{i=1}^2 h_{2i} \hat{y}_1 \cdot |\hat{y}_1|^{i-1} = h_{21} \hat{y}_1 + h_{22} \hat{y}_1 \cdot |\hat{y}_1|.$$

Инерционные свойства каскадов воспроизведены разностными схемами (11), (12) первого порядка:

$$(11) \quad \hat{y}_1(i+1) = \hat{f}_1(x(i)) \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_1}}) + \hat{y}_1(i) \cdot e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_1}} \cdot \hat{k}_1;$$

$$(12) \quad \hat{y}(i+1) = \hat{f}_2(\hat{y}_1(i)) \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_2}}) + \hat{y}(i) \cdot e^{-\frac{\tau}{\hat{T}_2}},$$

где z – сигнал на выходе первого каскада; $\hat{f}_1, \hat{f}_2, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1$ – оценки соответствующих параметров заданной нелинейной системы.

Функция цели идентификации этого варианта модели имеет вид (13):

$$(13) \quad e_2(h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1) = 10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^m (y(i) - \hat{y}(i))^2}{\sum_{i=1}^m y^2(i)} \right] \rightarrow \min.$$

Полученное значение $e_{2, \min} = -24$ дБ незначительно отличается от базового варианта $e_{1, \min} = -22$ дБ. Причина этого в том, что при переходе к каскадной структуре модели не была использована возможность организовать процесс идентификации по вектору состояния объекта.

2.3. Каскадная модель системы с идентификацией по вектору состояния

Структура покаскадной идентификации по вектору состояния системы показана на рис. 3. В этой структуре первый каскад занимает более высокий уровень иерархии по отношению ко второму – выходному каскаду.

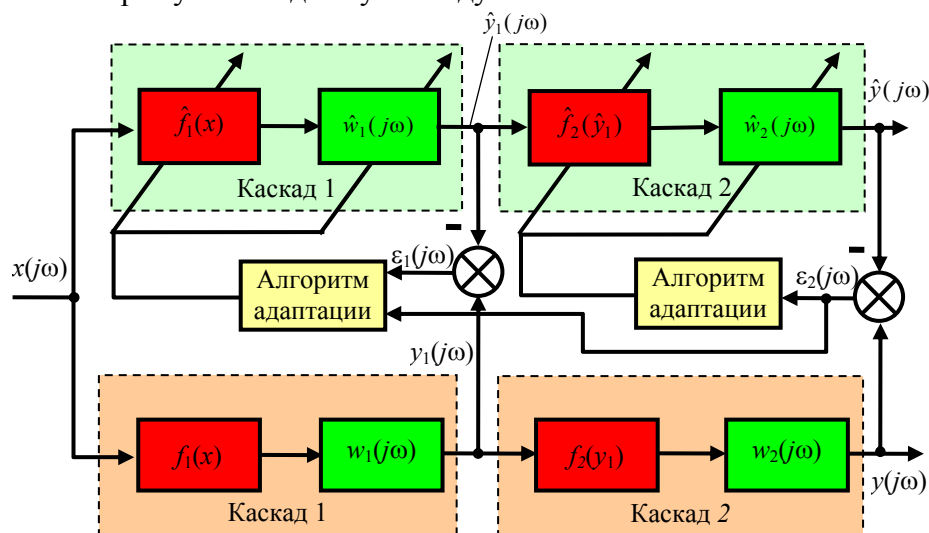


Рис. 3. Каскадная модель системы с идентификацией по вектору состояния.

Процесс идентификации осуществляется одновременно по каждому каскаду по отдельным функциям цели. Для первого каскада функция цели α является составной (14):

$$(14) \quad \alpha = \sqrt{b_1 \cdot \varepsilon_1^2 + b_2 \cdot \varepsilon_2^2} \rightarrow \min ,$$

где b_1, b_2 – весовые коэффициенты; $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(h_{11}, h_{12}, h_{13}, \hat{T}_1, \hat{k}_1) = \sum_{i=1}^m (y_1(i) - \hat{y}_1(i))^2$.

Величина ε_2 (15) отражает итоговую ошибку идентификации ε_3 :

$$(15) \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_2(h_{21}, h_{22}, \hat{T}_2) = \sum_{i=1}^m (y(i) - \hat{y}(i))^2 \rightarrow \min .$$

Результирующий показатель качества идентификации определялся в виде (16):

$$(16) \quad \varepsilon_3(h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{k}_1) = 10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^m (y(i) - \hat{y}(i))^2}{\sum_{i=1}^m y^2(i)} \right] \rightarrow \min .$$

Результат идентификации: $\varepsilon_{3, \min} = -31$ дБ.

Сравнительные характеристики рассмотренных выше вариантов моделей идентификации представлены в таблице.

Таблица 1. Сравнительные характеристики моделей идентификации

Вариант модели	Модель с сосредоточенными характеристиками	Каскадная модель с идентификацией по выходу	Каскадная модель с идентификацией по вектору состояния
Относительная ошибка, дБ	-22	-24	-31

Полученный результат подтверждает возможность существенного снижения ошибки нелинейной идентификации при использовании иерархически-модульной организации поиска параметров модели [11-13].

3. Заключение

Стремление к унификации методов нелинейной параметрической идентификации с адаптацией по выходу системы в кибернетическом плане соответствует использованию концепции «черного ящика» без учета доступной информации о внутренней структуре объекта. Такой подход к решению рассматриваемой задачи затрудняет получение моделей с низким уровнем ошибок идентификации.

Воспроизведение в модели внутренней структуры нелинейного объекта дает возможность перейти к иерархически-модульной организации процесса идентификации по вектору состояния системы и обеспечивает существенное снижение ошибки идентификации по сравнению с вариантом адаптации модели по выходному сигналу системы. При этом происходит декомпозиция многомерной задачи идентификации на подзадачи меньшей размерности, решение которых осуществляется одновременно в реальном масштабе времени.

В методологическом плане полученные результаты отражают возможности синергетического подхода к построению и идентификации сложных динамических систем.

Список литературы

1. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д.Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. 640 с.
2. Diniz P.S.R. Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation. New York: Springer Science, Business Media, 2013. 230 p.
3. Giri F., E.W. Block-Oriented Nonlinear System Identification. Heidelberg: Springer, 2010. 431 p.
4. Proletarsky A.V., Neusipin K.A. Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft // Science & military. 2010. Vol. 5. P. 75-80.
5. Макаров В.В., Жиров М.В., Куроткин В.А. Моделирование и исследование рекуррентных алгоритмов идентификации нестационарных параметров объектов управления // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2679-2684.
6. Павленко В.Д., Павленко С.В. Методы детерминированной идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерры // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2830-2841.
7. Сакрутина Е.А., Бахтадзе Н.Н. Идентификация систем на основе вейвлет-анализа // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2868-2889.
8. Чадеев В.М. Цифровая идентификация нелинейных динамических объектов // Автоматика и телемеханика. 2004. № 12. С. 85-93.
9. Эйкофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 680 с.
10. Пашенко А.Ф., Пашенко Е.Ф. Идентификация нелинейных систем в классе блочно-ориентированных моделей // Информатика и системы управления. 2010. № 4 (26). С. 149-160.
11. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Многоальтернативные системы интеллектуального управления: принципы построения и пути реализации // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 996-1007.
12. Podvalny S L, Vasiljev E.M., Varabanov V.F. Models of multi-alternative control and decision-making in complex systems // Automation and Remote Control . 2014. Vol. 75, No. 10. P. 1886-1890.
13. Podvalny S L, Vasiljev E.M. Multi-alternative control of large systems // 13th Int. Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”. St. Petersburg. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 161.