

Параметрическая идентификация распределенной мультисенсорной системы фильтрации

И.В. Семушин
Ульяновский государственный
университет
Ульяновск, Россия
kentvsem@gmail.com

Ю.В. Цыганова
Ульяновский государственный
университет
Ульяновск, Россия
tsyganovajv@gmail.com

А.В. Цыганов
Ульяновский государственный
педагогический университет
им. И.Н. Ульянова
Ульяновск, Россия
andrew.tsyganov@gmail.com

Аннотация—Работа посвящена решению задачи параметрической идентификации распределенной мультисенсорной системы фильтрации. Для решения задачи предложен новый гибридный алгоритм параметрической идентификации, основанный на применении метода вспомогательного функционала качества (ВФК). Впервые показано, как можно вычислить градиент критерия ВФК в распределенной мультисенсорной системе. Алгоритм реализован и протестирован в программной среде MATLAB.

Ключевые слова —параметрическая идентификация, мультисенсорная система, распределенная фильтрация Калмана, вспомогательный функционал качества, гибридный алгоритм.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из наиболее популярных подходов к фильтрации измерительных данных являются методы фильтрации Калмана, которые применяются в различных областях исследований и во многих практических приложениях [1].

Различают два типа калмановской фильтрации: ковариационная и информационная. Если ковариационная форма фильтра Калмана уже давно является “стандартным” алгоритмом, то информационная форма приобрела известность при решении задач распределенной фильтрации в мультисенсорных динамических системах [2].

Целью данной работы является решение вопроса о применимости метода вспомогательного функционала качества (ВФК) в задаче параметрической идентификации распределенной мультисенсорной системы фильтрации. Предложенное новое решение основано на информационном фильтре Калмана.

2. МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Рассмотрим распределенную мультисенсорную систему фильтрации полезного сигнала $x(t_k)$ по данным измерений $y_i(t_k)$, доступным от $i=1,2,\dots,m$ сенсоров в дискретные моменты времени $t_k=kT$ ($k=1,2,\dots,N$), где T обозначает заданный темп измерений. Пусть математическая модель данной системы представлена разностными уравнениями [3]:

$$\left. \begin{aligned} x(t_k) &= dx(t_{k-1}) + A\sqrt{1-d^2}w(t_k) \\ y_i(t_k) &= x(t_k) + v_i(t_k), \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $w(t_k)$ и $v_i(t_k)$ – взаимно независимые дискретные белые шумы с нулевым средним и дисперсиями $Q=1$ и $R_i=B_i^2$, соответственно.

Обозначим через $\theta=(d, A^2, B_1^2, \dots, B_m^2)^T$ – параметры модели (1). Если значение θ известно, тогда фильтрация полезного сигнала $x(t_k)$ по данным мультисенсоров $y_i(t_k)$ может быть выполнена с помощью информационного фильтра Калмана. В данной работе мы рассматриваем систему (1) с параметрической неопределенностью, т. е. в предположении, что значение параметра θ не известно.

Задача параметрической идентификации заключается в вычислении оценок параметра неопределенности θ по данным мультисенсоров $y_i(t_k)$. Для решения применим метод ВФК [4]. Известно, что данный метод позволяет получать несмещенные оценки вектора параметров θ по наблюдаемым входным и выходным данным. В [3, Теорема 2] построен критерий идентификации в форме ВФК для распределенной мультисенсорной системы фильтрации.

Пусть $D(\theta)$ – область определения параметра θ . Алгоритм параметрической идентификации строят путем реализации процедуры численной минимизации критерия ВФК, т. е. оценку $\hat{\theta}^*$ вычисляют по принципу

$$\hat{\theta}^* = \underset{\hat{\theta} \in D(\theta)}{\operatorname{argmin}} J_{\text{ВФК}}(\hat{\theta}). \quad (2)$$

Настоящая работа предлагает новый гибридный алгоритм идентификации параметра θ , суть которого в том, что оценка находится в два этапа:

1) вычисление начального приближения с помощью метаэвристического алгоритма оптимизации [5] и

2) уточнение найденной оценки с помощью алгоритма оптимизации градиентного типа [6]. Такой подход позволяет на первом этапе расширить пространство поиска, а на втором этапе – быстро уточнить найденную оценку.

Более того, для второго этапа мы впервые показываем, как вычислять градиент критерия ВФК по данным мультисенсоров, а именно, доказано следующее

Утверждение. Значения критерия ВФК и его градиента

$$\nabla_{\theta} J_{\text{ВФК}}(\hat{\theta}) = \left[\frac{\partial J_{\text{ВФК}}(\hat{\theta})}{\partial \theta_1} \quad \dots \quad \frac{\partial J_{\text{ВФК}}(\hat{\theta})}{\partial \theta_p} \right]^T$$

в алгоритме параметрической идентификации можно вычислить как

$$J_{\text{ВФК}}(\hat{\theta}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\varepsilon_k^-(\hat{\theta})]^2 \text{ и} \quad (3)$$

$$\frac{\partial J_{\text{ВФК}}(\hat{\theta})}{\partial \theta_j} = \left. \frac{\partial J_{\text{ВФК}}(\theta)}{\partial \theta_j} \right|_{\theta=\hat{\theta}} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon_k^-(\hat{\theta}) \left. \frac{\partial \varepsilon_k^-(\theta)}{\partial \theta_j} \right|_{\theta=\hat{\theta}}$$

где $p=m+2$, $\hat{\theta}$ – значение параметра θ ,

$$\varepsilon_k^-(\hat{\theta}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i(t_k) - s_k^-(\hat{\theta}) / \lambda_k^-(\hat{\theta}),$$

значения величин $s_k^-(\hat{\theta})$ и $\lambda_k^-(\hat{\theta})$ получены в распределенной схеме информационной калмановской фильтрации [3, разд. 4].

Доказательство основано на определении ВФК, правилах дифференцирования векторных функций и уравнениях распределенной калмановской фильтрации.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построен новый гибридный алгоритм параметрической идентификации распределенной мультисенсорной системы фильтрации, основанный на применении метода ВФК. Гибридность алгоритма означает наличие двух шагов:

1) вычисление начального приближения метаэвристическим алгоритмом и

2) уточнение найденной оценки градиентным алгоритмом.

Впервые показано, как вычислять градиент критерия ВФК в распределенной мультисенсорной системе. Алгоритм реализован и протестирован в среде MATLAB.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-41-732002 р_мк.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kordic, V. Kalman Filter / V. Kordic. – London, United Kingdom: IntechOpen, 2010. URL: <https://www.intechopen.com/books/4459>.
- [2] Mahmoud, M.S. Distributed Kalman filtering: a bibliographic review / M.S. Mahmoud, H.M. Khalid // IET Control Theory Appl. – 2013. – Vol. 7(4). – P. 483-501. DOI: 10.1049/iet-cta.2012.0732.
- [3] Семущин, И.В. Активная адаптация распределенной мультисенсорной системы фильтрации / И.В. Семущин, Ю.В. Цыганова // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2019. – Т. 23, № 4. – С. 724-743. DOI: 10.14498/vsgtu1704.
- [4] Semushin, I.V. The APA based time-variant system identification / I.V. Semushin // Proc. of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control. – 2014. – P. 4137-4141. DOI: 10.1109/CDC.2014.7040033.
- [5] Пантелеев, А.В. Метаэвристические алгоритмы глобальной оптимизации / А.В. Пантелеев, Д.В. Скавинская. – М.: Вузовская книга, 2019. – 332 с.
- [6] Fletcher, R. Practical Methods of Optimization / R. Fletcher. – Chichester, Great Britain: John Wiley & Sons Ltd, 1988. – 436 p.