Инструментально-критериальные (активные) методы адаптации и контроля непредвиденных ситуаций для сложных систем обработки данных

И.В. Семушин[1]

[1]Ульяновский государственный университет, Л. Толстого 42, Ульяновск, Россия, 432017

Аннотация

Активный Принцип Адаптации сводится к построению Вспомогательного Функционала Качества (ВФК) как инструмента численной оптимизации системы. ВФК должен заменять Исходный Функционал Качества (ИФК) потому что последний не может служить таким инструментом. Главное требование к ВФК: он должен достигать своего минимума одновременно с ИФК. Отклонение вектора градиента ВФК от нулевой точки служит признаком непредвиденной ситуации для ее своевременного обнаружения. АПА продемонстрирован реальной задачей параметрической идентификации погрешностей ИНС (инерциальной навигационной системы). Данное решение выдвинуто в качестве альтернативы классическому (льюнговскому) принципу Минимума Ошибки Предсказания (МОП), поскольку обеспечивает несмещенное оценивание параметров и состояния системы.

Ключевые слова

калмановская модель данных, обнаружение нарушений модели, адаптивное оценивание параметров, несмещенность оценок

1. Введение

Задачи параметрической адаптации и контроля нарушений линейных систем используют достаточно общую модель (1) стохастического зашумленного источника данных с управлением в дискретном времени $t \in \mathbb{Z}$ [1]:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= \Phi x_t + \Psi u_t + \Gamma w_t, \quad & t \geq 0, \\ z_t &= H x_t + v_t, & t \geq 1, \end{aligned} \tag{1}$$

в которой x_t – n-мерный вектор состояния системы в момент времени t, $\Phi \equiv \Phi_t$ – переходная ($n \times n$) -матрица состояния в момент t, u_t – r-мерный вектор детерминированного управления, $\Psi \equiv \Psi t$ – ($n \times r$)-матрица подачи управления в момент t, w_t – случайное возмущение, $\Gamma \equiv \Gamma_t$ – входная ($n \times l$)-матрица возмущения, z_t доступный для наблюдения m-мерный вектор измерения, $H \equiv H_t$ – матрица наблюдения, v_t случайная погрешность измерения. Принято считать, что $\{w_0, w_1,\ldots\}$и $\{v_1, v_2,\ldots\}$ – независимые последовательности одинаково распределенных независимых векторов с нулевыми средними значениями и ковариационными матрицами $Q \geq 0$, $R > 0$ (соответственно) и что x_0 есть случайная величина, не зависимая от указанных последовательностей и обладающая средним значением $\bar{x}_0$ и ковариацией P_0. Когда параметры Φ, Γ, Q, H, R, $\bar{x}_0$, P_0 заданы, линейные оптимальные оценки $x_{i|t},\ z_{i|t},\ i \geq t$, векторов x_i, z_i вычисляют как их проекции на гильбертово пространство, натянутое на все доступные к моменту времени t измерения $z_1^t = (z_1, \ldots, z_t)$, в известных уравнениях фильтра Калмана. Когда это не так, фильтр должен быть Калман-подобным и адаптивным.

Чтобы адаптивный Калман-подобный фильтр (АКПФ), вырабатывающий оценки и совпадал с оптимальным алгоритмом КФ, необходим и достаточен одновременно достигаемый минимум (по параметрам АКПФ) квадратичных функционалов

$$J(e_{t+1|t}) \triangleq ||e_{t+1|t}||^2; \quad J(e_{t|t}) \triangleq ||e_{t|t}||^2 \tag{2}$$

($||e||^2 \triangleq \mathbf{E}\{e^T e\}$ средний квадрат евклидовой нормы вектора) от ошибок предсказания и фильтрации, возникающих в АКПФ при оценках состояний x_{t+1} и x_t:

$$e_{t+1|t} \triangleq x_{t+1} - \widehat{x}_{t+1|t}; \quad e_{t|t} \triangleq x_t - \widehat{x}_{t|t}. \tag{3}$$

Главное препятствие, с которым сталкиваются инженеры, является неинструментальность критериев (2). Это означает, что они не могут быть инструментами адаптации или контроля качества АКПФ в любых практических алгоритмах.

2. Демонстрационный пример модели ошибок ИНС

Для конкретизации общих выражений (1) возьмем упрощенную дискретную модель (4) ошибок одного горизонтального канала инерциальной навигационной системы (ИНС). В ней требуется оценивать вектор параметров θ:

$$\left.\begin{aligned}
&x = \left[\Delta v_x \mid \beta \mid m_{Ax}\right]^T; \quad u_t = 1 \text{ (const)}; \quad w_t \sim \mathcal{N}(0,1); \quad Q = 1\\
&\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \phi_{12} & \tau \\ \phi_{21} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_2 \end{bmatrix}; \quad \Psi = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau\theta_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta_3 \end{bmatrix}; \quad \theta^T = \left[\theta_1 \mid \theta_2 \mid \theta_3 \mid \theta_4\right]\\
&H = \left[1 \mid 0 \mid 0\right]; \quad v_t \sim \mathcal{N}(0,R); \quad R_{m_{Ax}m_{Ax}}(t) = A^2 \exp(-\alpha|t|)\\
&\theta_1 = n_{Gy}; \quad \theta_2 = d \triangleq \exp(-\alpha|\tau|); \quad \theta_3 = \sigma \triangleq A\sqrt{1-d^2}; \quad \theta_4 = \sqrt{R}\\
&\phi_{12} = -\tau g; \quad \phi_{21} = \tau / r; \quad \rho = -\phi_{12}\phi_{21} = \tau^2 g / r \text{ (const)}
\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

где x вектор-столбец состояния, в котором Δv_x ошибка определения скорости объекта вдоль оси Ox гироплатформы, β – угловая ошибка определения вертикали места, m_{Ax} случайный дрейф показаний акселерометра с корреляционной функцией $R_{m\text{Ax}}\ m\text{Ax}\ (t)$, n_{Gy} – постоянный дрейф гироскопа. Постоянные величины τ, g, r соответственно равны темпу поступления и обработки данных, ускорению свободного падения, большой полуоси Земли.

3. Заключение

В работе показано, что задачи адаптации и контроля непредвиденных ситуаций в стохастических динамических системах обработки информации могут быть успешно решены на основе активного принципа даже в условиях неинструментальности исходных функционалов оптимальности (2). Это решение может составить полезную альтернативу классическому (льюнговскому) принципу Минимума Ошибки Предсказания (МОП) [2], поскольку обеспечивает несмещенное оценивание параметров и состояния системы.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научных проектов № 18-47-730001 р_а и № 18-41-732002 р_мк.

5. Литература

[1] Semushin, I.V. Numerically Implementing the API Based Solution to Learn a Plant Dynamics for Stochastic Control Concurrently / I.V. Semushin, Ju.V. Tsyganova // IEEE European Control Conference (ECC). – 2020. – P. 1105-1110.

[2] Ljung, L. Convergence analysis of parametric identification methods / L. Ljung // IEEE Trans. Automat. Contr. – 1978. – Vol. AC-23(5). – P. 770-783.