

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

В.М. Понятский (Тула)

Введение

Процесс проектирования сложных технических комплексов управления неразрывно связан с использованием методов моделирования, позволяющих обеспечить отработку и оценку эффективности разрабатываемых систем. Рассматриваются системы, в которых формирование управляющих воздействий осуществляется на основе измеряемых информационных сигналов. Повышение устойчивости систем к воздействию возмущений в виде помех измерения координат обеспечивается взаимосвязанным выбором параметров алгоритма фильтрации и алгоритма управления (см. рис. 1).

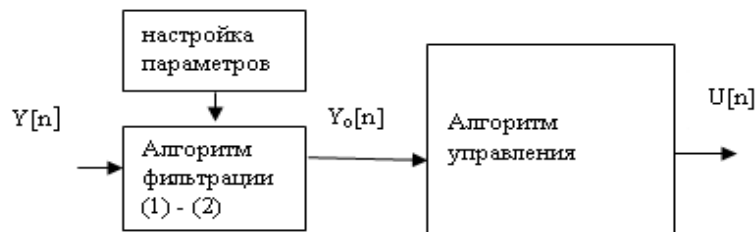


Рис. 1. Структурная схема алгоритма формирования команд управления

Для фильтрации гауссовских шумов широко используются алгоритмы фильтрации Калмана [1]. Для обеспечения устойчивости системы управления с фильтром Калмана может быть введена обратная связь по командам управления $U[n]$, исходя из выполнения принципа минимально фазового сопряжения процессов оценивания и управления во временной и частотной областях при условии, что передаточная функции по цепи обратной связи равна передаточной функции объекта управление $W_{oc} = W_{ou}$ [2]:

$$W_c = W_D W_A,$$

где W_c – желаемая передаточная функция замкнутой системы с фильтром; W_D – передаточная функция фильтра; W_A – передаточная функция системы без фильтра.

Формирование требуемых динамических характеристик системы управления (полосы пропускания, запасов устойчивости, точности и т.д.) может быть проведено методом частотных характеристик и возможно при разных соотношениях полосы пропускания системы без фильтра f_A и полосы пропускания фильтра f_D . Если требуемое качество управления обеспечивается выбором полосы пропускания системы без фильтра W_A меньшей, чем полоса пропускания фильтра W_D : $f_A < f_D$, то динамические свойства системы управления в значительной степени определяются алгоритмом формирования команд управления, а алгоритм фильтрации обеспечивает необходимое подавление в сигнале ошибки управления помех измерения.

Требуемые свойства системы при задании полосы системы без фильтра W_A большей, чем полоса пропускания фильтра W_D : $f_A > f_D$ обеспечиваются за счет повышения коэффициента передачи системы (добротности) и уменьшения полосы пропускания фильтра. В этом случае можно обеспечить полосу пропускания фильтра, соизмеримую с рабочей полосой системы. Если обеспечить значительное повышение добротности при понижении частоты пропускания фильтра, то система будет обладать высокими динамическими свойствами, но при этом возрастает уровень шумовой составляющей в командах управления.

Однако наличие в информационных сигналах помех со смещением приводит к возникновению ошибок в результатах обработки, и, следовательно, к неточной работе системы. Так, например, постоянное смещение в помехе приведет к тому, что это смещение будет отработано системой и в выходной координате появится смещение.

Рандомизированные алгоритмы обработки сигналов для замкнутой системы управления

В работе [2] предлагается использовать рандомизированные алгоритмы оценивания, работоспособные при фильтрации случайного процесса с наложенным гауссовским шумом со смещением.

Пусть наблюдается сигнал, представляющий смесь процесса $Q[n]$ и помехи наблюдения $v[n]$

$$Y[n] = \varphi^T[n] Q[n] + H[n]v[n]$$

где $Q[n+1] = A[n]Q[n] + w[n]$, $\varphi[n]$ – заданная случайная последовательность.

Рандомизированный алгоритм в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} Q_o[n+1] &= A[n]Q_o[n] + K[n]\Delta[n]\{y[n] - \varphi^T[n] Q_o[n]\}; \\ \Delta[n] &= \varphi[n] - E\{\varphi[n]\}. \end{aligned} \tag{1}$$

Алгоритм (1) предназначен для обработки измеряемых сигналов в информационных системах.

Непрерывный фильтр Калмана для случая использования рандомизированной обработки сигналов в замкнутых системах управления можно представить в следующем виде [4]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_o(t)}{dt} &= \mathbf{A}(t)x_o(t) + \mathbf{B}(t)U(t) + \mathbf{K}(t)\Delta(t)\{y(t) - \varphi(t)\mathbf{C}(t)x_o(t)\}; \\ \mathbf{K}(t) &= \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T(t)\mathbf{V}_v^{-1}(t); \\ \frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} &= \mathbf{A}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\Phi^T(t) - \mathbf{P}(t)\mathbf{C}(t)^T\mathbf{V}_v^{-1}(t)\mathbf{C}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{V}_w(t), \end{aligned} \tag{2}$$

где $\mathbf{u}(t)$ – вектор управления; $\mathbf{y}(t)$ – вектор наблюдения; $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояния; $\mathbf{w}(t)$ – вектор формирующих шумов интенсивностью $\mathbf{V}_w(t)$; $\mathbf{v}(t)$ – вектор шумов измерения интенсивностью $\mathbf{V}_v(t)$; $\mathbf{A}(t)$ – функция состояния; $\mathbf{C}(t)$ – матрица наблюдения; $\mathbf{x}_o(t)$ – вектор оценок состояния; $\mathbf{P}(t)$ – корреляционная матрица ошибок фильтрации; $\mathbf{K}(t)$ – матрица коэффициентов фильтра.

Дискретный рандомизированный алгоритм фильтрации и экстраполяции измеряемых координат сформирован в рамках методов фильтрации Калмана:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_o[n+1/n] = \mathbf{F}[n]\mathbf{x}_o[n] + \mathbf{B}[n]\mathbf{u}[n]; \\ \mathbf{x}_o[n] = \mathbf{x}_o[n/n-1] + \mathbf{K}[n]\Delta[n]\{y[n] - \varphi[n]\mathbf{C}[n]\mathbf{x}_o[n/n-1]\}; \\ \mathbf{y}_o[n] = \mathbf{C}[n]\mathbf{x}_o[n/n-1], \end{cases} \tag{3}$$

где $\mathbf{F}[n]$ – переходная матрица; $\mathbf{u}[n]$ – вектор управляющих воздействий; $\mathbf{B}[n]$ – матрица коэффициентов; $\mathbf{w}[n]$ – вектор формирующих шумов с интенсивностью $\mathbf{V}_w = E\{\mathbf{w}[n]\mathbf{w}^T[n]\}$; $\mathbf{C}[n]$ – матрица наблюдения; $\mathbf{v}[n]$ – вектор шумов измерения с интенсивностью $\mathbf{V}_v = E\{\mathbf{v}[n]\mathbf{v}^T[n]\}$; $\mathbf{x}[n]$ – вектор фазовых координат; $\mathbf{y}_o[n]$ – оценка координат; $\mathbf{x}_o[n]$ – оценка вектора фазовых координат; $\mathbf{x}_o[n+1/1]$ – оценка вектора прогнозирования фазовых координат; $\mathbf{K}[n]$ – матрица коэффициентов фильтрации.

Рандомизированный алгоритм второго порядка для оценки выходной координаты x_1 динамического объекта в соответствии с (2) имеет вид (рис. 2):

$$\begin{cases} \dot{x}_{1o}(t) = x_{2o}(t) + k_1 \Delta(t)[y(t) - \varphi(t)x_{1o}(t)]V_v^{-1}; \\ \dot{x}_{2o}(t) = -k u(t) + k_2 \Delta(t)[y(t) - \varphi(t)x_{1o}(t)]V_v^{-1}. \end{cases} \quad (4)$$

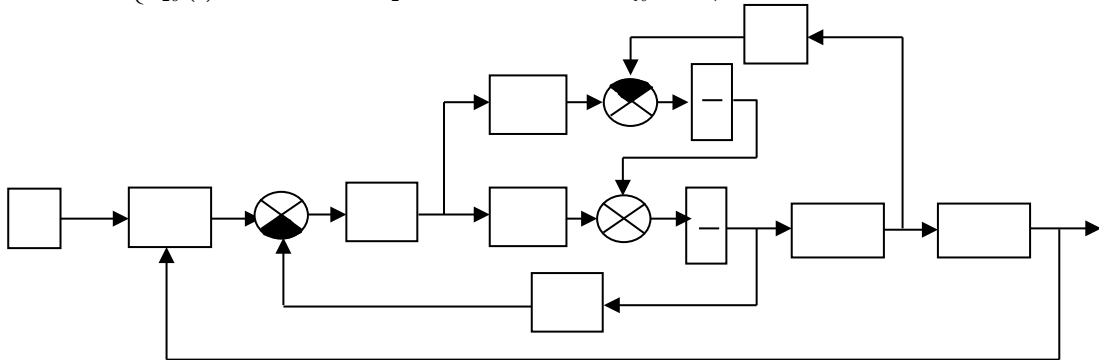


Рис. 2. Структурная схема системы с рандомизированным алгоритмом оценки выходной координаты x_1 (4): З – задатчик входных сигналов, ИУ – измерительное устройство, БУ – блок управления, ДО – динамический объект

Требуемые динамические свойства системы управления при использовании рандомизированных алгоритмов (2) и (3) обеспечиваются за счет введения и выбора соответствующих параметров обратной связи по командам управления U , реализующей принцип сопряженных алгоритмов обработки измеряемых информационных сигналов и формирования команд [2].

Рандомизированные алгоритмы идентификации

Рассмотрим другую постановку задачи. Необходимо по измеряемым входным сигналам (вектор управления u) и выходным сигналам (вектор наблюдения z), при известной структуре объекта (f, G или f, Γ) и измерителя (матрица наблюдения H) получить оценку элементов f, G или f, Γ . Указанная задача может быть решена с использованием алгоритмов инвариантного погружения [1].

Для реализации рандомизированного подхода при идентификации динамических систем с помощью алгоритмов инвариантного погружения необходимо два условия. Во-первых, наличие пробного сигнала (φ) в измеряемых сигналах y , и во-вторых, соответствующей обработкой измеряемых сигналов:

- для непрерывного случая:

$$\dot{x}_o(t) = f[x_o(t), u(t), t] + P(t)H(t)V_v^{-1}(t)\Delta(t)[z(t) - \varphi(t)H(t)x_o(t)]; \quad (5)$$

$$\dot{P}(t) = G[x_o(t), t]V_w G^T[x_o(t), t] + P(t) \frac{\partial f^T[x_o(t), u, t]}{\partial x_o(t)} + \frac{\partial f[x_o(t), u, t]}{\partial x_o(t)} P(t) - P(t)H^T(t)V_v^{-1}(t)H(t)P(t),$$

где x_o – оценка расширенного вектора состояний; P – корреляционная матрица ошибок фильтрации; начальные условия: $x(t_0) = \mu_{x_0}$; $P(t_0)$;

- для дискретного случая:

$$x_o(n+1|n) = f[x_o(n), u, n]; \quad (6)$$

$$x_o(n+1) = x_o(n|n-1) + P(n)H^T(n)V_v^{-1}(n)\Delta[n]\{z(n+1) - \varphi[n]H(n)x_o(n|n-1)\};$$

$$P(n+1|n) = \Gamma[x_o(n)]V_w \Gamma^T[x_o(n)] + \frac{\partial f^T[\hat{x}_o(n), u, n]}{\partial x_o(n)} P(n) \frac{\partial f^T[\hat{x}_o(n), u, n]}{\partial x_o(n)};$$

$$P(n+1) = P(n|n-1) - P(n|n-1)H^T(n)[H(n)P(n|n-1)H^T(n+1) + V_v(n)]H(n)P(n|n-1).$$

Рандомизированный алгоритм одновременной оценки выходной координаты x_1 , коэффициента передачи $x_2 = k$ и постоянной времени $x_3 = 1/T$ динамического объекта в соответствии с (5) имеет вид (рис. 2):

$$\begin{cases} \dot{x}_{10}(t) = -x_{10}(t)x_{30}(t) + x_{20}(t)x_{30}(t)U(t) + P_{11}\Delta(t)[y(t) - \varphi(t)x_{10}(t)]V_v^{-1}; \\ \dot{x}_{20}(t) = P_{12}\Delta(t)[y(t) - \varphi(t)x_{10}(t)]V_v^{-1}; \\ \dot{x}_{30}(t) = P_{13}\Delta(t)[y(t) - \varphi(t)x_{10}(t)]V_v^{-1}. \end{cases} \quad (7)$$

Предложенный подход по оценке коэффициентов модели динамического объекта позволяет повысить устойчивость оценок при наличии смещений в шумах измерения. Например, предложенный алгоритм может быть использован для обработки телеметрической информации с борта летательного аппарата, передаваемой по радиолокационному каналу.

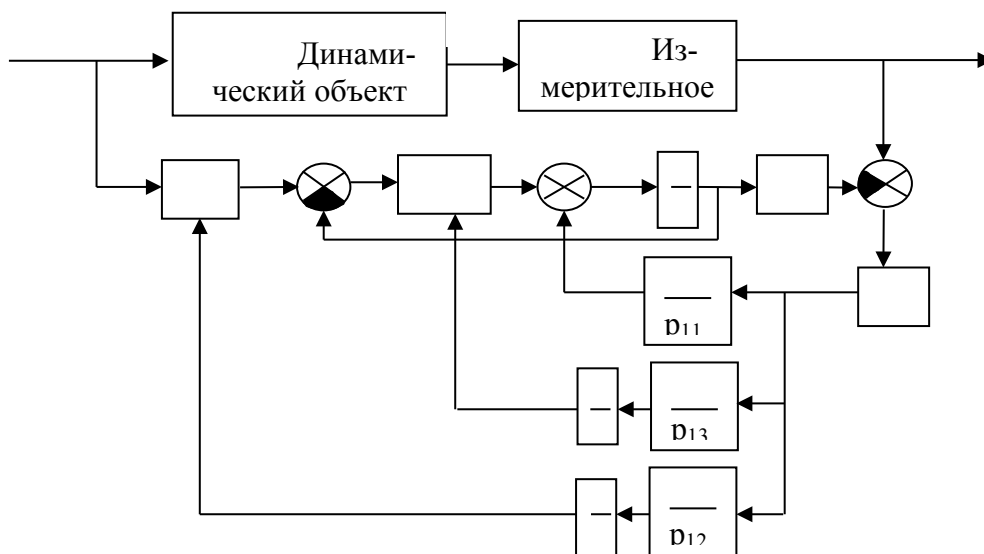


Рис. 3. Структурная схема системы с рандомизированным алгоритмом () одновременной оценки выходной координаты x_1 , коэффициента передачи $x_2 = k$ и постоянной времени $x_3 = 1/T$

Результаты

Проведено проектирование алгоритмов фильтрации для систему управления летательного аппарата при следующих исходных данных:

$$F[n] = \begin{vmatrix} 1 & T_o \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad B[n] = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ -k[n-1] & 0 \end{vmatrix}; \quad C[n] = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad H[n] = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad E[n] = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Рандомизированный алгоритм (4) в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} x_{1M}[n] &= x_{1D}[n-1] + x_{2D}[n-1]T_o; \\ x_{2M}[n] &= x_{2D}[n-1] - k[n-1]u[n-1]; \\ x_{1D}[n] &= x_{1M}[n] + k_{11}[n]\Delta[n](y[n] - \varphi[n]x_{1M}[n]); \\ x_{2D}[n] &= x_{2M}[n] + k_{12}[n]\Delta[n](y[n] - \varphi[n]x_{1M}[n]), \end{aligned} \quad (8)$$

где $y[n]$ – измеренная выходная координата; $x_{1D}[n]$ – оценка выходной координаты; $k_{11}[n]$, $k_{12}[n]$ – коэффициенты фильтра; $k[n]$ – коэффициент передачи обратной связи по командам управления $u[n]$.

Алгоритм фильтрации Калмана для исходных данных, используемых при проек-

Секция 1

тировании (8), имеет вид:

$$\begin{aligned} x1_M[n] &= x1_D[n-1] + x2_D[n-1]T_o ; \\ x2_M[n] &= x2_D[n-1] - k[n-1]u[n-1]; \\ x1_D[n] &= x1_M[n] + k11[n](y[n] - x1_M[n]); \\ x2_D[n] &= x2_M[n] + k12[n](y[n] - x1_M[n]). \end{aligned} \tag{9}$$

Отработка разработанного алгоритма (8) проведена с помощью методов моделирования. При этом использован модельно-ориентированный подход. На рис. 4 приведена разработанная в среде Matlab модель системы управления летательным аппаратом с рандомизированным алгоритмом обработки измеряемых сигналов (9).

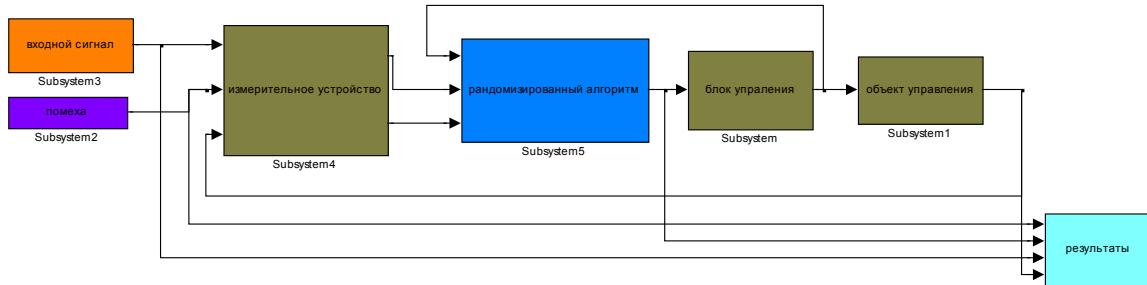


Рис. 4. Модель системы управления с рандомизированным алгоритмом обработки сигналов

На рис. 5а приведены результаты моделирования работы системы с разработанным рандомизированным алгоритмом (8). Для сравнения на рис. 5б приведены результаты функционирования системы с использованием алгоритмов фильтрации Калмана (9).

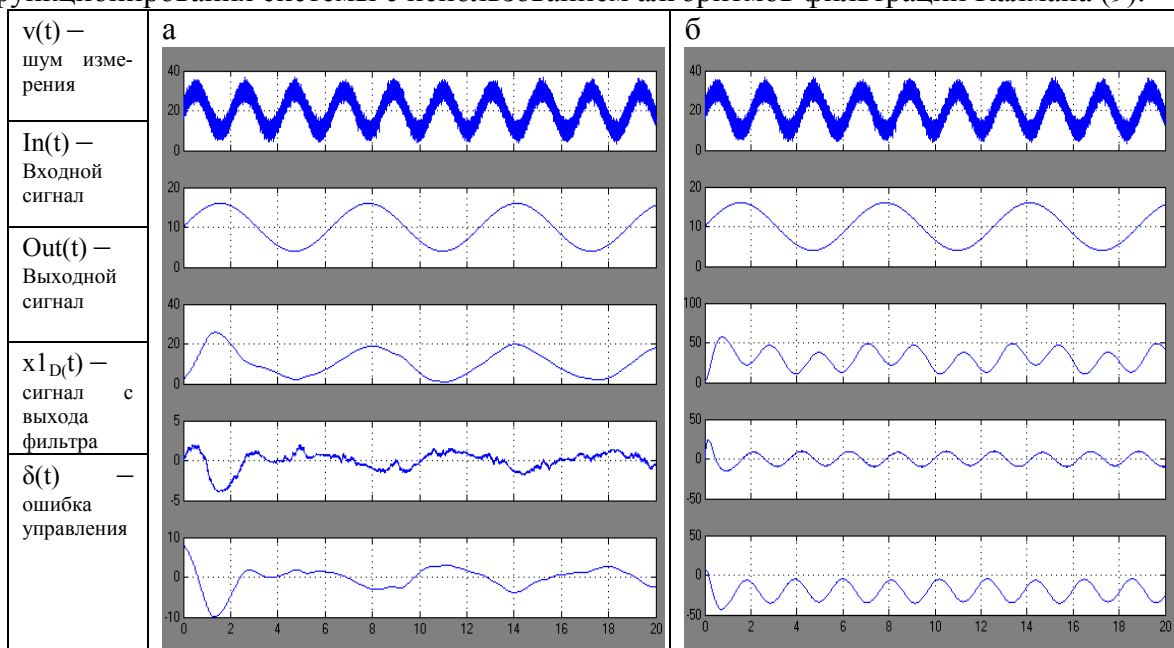


Рис. 5. Результаты моделирования системы управления: а) с рандомизированным алгоритмом (8); б) с фильтром Калмана (9)

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что система с рандомизированным алгоритмом (8) обрабатывает входной сигнал $In[t]$ и не чувствительна к помехе $v(t)$ (см. ошибка управления – $\delta(t) = In(t) - Out(t)$, рис. 5а), в отличие от системы с фильтром Калмана (9), в которой выходная координата $Out(t)$ отслеживает

Секция 1

не только входной сигнал $In(t)$, но и низкочастотную составляющую помехи измерения $v(t)$ (рис. 5б).

Проведенные исследования в среде Matlab позволили провести отладку разработанного рандомизированного алгоритма и показали, что его использование в замкнутой системе позволяет повысить качество управления в условиях воздействия почти произвольной помехи.

Литература

1. Сейдж Э., Мелса Дж. Теория управления и ее применение в связи и управлении – М.: Связь, 1976. – 496 с.
2. Понятский В.М. Повышение помехоустойчивости системы управления вращающегося летательного аппарата // Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов – М.: МАИ, 2005. С 229 – 234.
3. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах – М.: Наука, 2003. – 291 с.
4. Понятский В.М. Использование рандомизированных алгоритмов обработки информационных сигналов при управлении летательным аппаратом // Стохастическая оптимизация в информатике. Межвузовский сборник. /Под ред. О.Н. Граничина – СПб.: Издательство С. – Петербургского университета, 2015. Вып.4. С. 186 – 200.