Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 67 www.mai.ru/science/trudy/

УДК 629.7.05

Некоторые практические способы независимого оценивания параметров объектов авиационных систем

Елисеев В. Д., Белова Е. С., Котельникова А. В., Чемоданов В. Б.*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**email:chemv@gmail.com*

Аннотация

В статье предлагаются практические способы оценивания в реальном масштабе времени неизвестных параметров ряда типовых объектов. Способы позволяют непрерывно оценивать какой-либо или каждый параметр независимо от других, что существенно повышает точность и ускоряет процесс оценивания.

Ключевые слова: оценивание, определители формул Крамера, невязка, квадрат ошибки, статические и динамические объекты, динамические коэффициенты самолета.

Введение

Известен ряд способов оценивания (идентификации) неизвестных параметров статических и динамических объектов управления заданной структуры [1÷8].

Для многих задач наиболее привлекательными являются способы, которые основаны на стремлении минимизировать текущий квадрат ошибки (невязки), зависящей от ошибок оценивания параметров. Однако их недостаток состоит в том, что текущие оценки оказываются зависящими друг от друга и от начальных условий объекта, а скорости настройки оценок каждого параметра не дают правильного независимого стремления к его истинному значению. Использование таких оценок приводит к неправильной работе системы управления объектом, так как для нее важен не минимум общей ошибки, а минимумы ошибок оценивания каждого из параметров, оценки которых играют свою особую роль в алгоритмах управления объектом. Это приводит к необходимости изменений способов оценивания.

Основная идея предлагаемых способов оценивания неизвестных параметров статических и динамических объектов известной структуры состоит в одновременном непрерывном использовании не только текущих измеряемых входных и выходных координат объекта, но и близких по времени прошлых значений этих координат [9]. Эти значения можно получить с помощью звеньев запаздывания или других динамических звеньев и фильтров в соответствии с числом оцениваемых параметров объекта. Получаемая при этом совокупность уравнений объекта может быть преобразована так, чтобы свести задачу оценивания всех параметров объекта по общей невязке к нескольким задачам оценивания только одного параметра по своей невязке, что позволяет обеспечить независимое (раздельное) оценивание всех или только требуемых параметров.

2. Оценивание параметров статических объектов

Статические объекты являются более простыми в сравнении с динамическими объектами, однако, многие особенности оценивания их параметров могут быть использованы также при оценивании параметров динамических объектов.

2.1. Постановка задачи

Пусть имеется линейный статический объект, соответствующий уравнению

$$y = x_1 k_1 + x_2 k_2 + \dots + x_m k_m \qquad (1)$$

или в векторной форме

$$y = \boldsymbol{x}\,\boldsymbol{k},$$

где $\boldsymbol{x}$ – m – мерный вектор входных воздействий $\boldsymbol{x} = [x_1, x_2, \dots x_m]$, составляющие которого в общем случае измеряются с помехами;

y – скалярная выходная координата, измеряемая также с помехами;

$\boldsymbol{k} = [k_1, k_2, \dots, k_m]^{\mathrm{т}}$ - вектор- столбец неизвестных параметров объекта.

Требуется сформировать систему непрерывного независимого оценивания какого-либо или каждого параметра k_i (i =1, 2, …, m) в реальном масштабе времени с возможностью обеспечения требуемой точности оценивания по крайней мере для стационарных объектов при достаточных спектральных составах и уровнях полезных составляющих входных воздействий.

2.2. Решение задачи

Требуемое решение поставленной задачи можно получить сразу, но только в частном случае, когда имеется лишь один неизвестный параметр k_i , а остальные равны нулю. В этом случае можно сформировать невязку вида

$$\varepsilon_i = y - x_i\, k_{ie}, \qquad (2)$$

где k_{ie} - оценка неизвестного параметра k_i . Оценку можно настраивать методом градиента, минимизируя текущий квадрат ошибки $J = \varepsilon_i^2$. [2]. Однако, если имеется несколько неизвестных параметров, минимизация квадрата общей невязки вида

$$\varepsilon = y - x_1 k_1 - x_2 k_2 - \ldots - x_m k_m \qquad (3)$$

будет иметь все недостатки, указанные во введении. Поэтому получим решение задачи оценивания, реализуя предложенную во введении идею.

Будем использовать совокупность m непрерывно измеряемых текущих и близких по времени прошлых значений сигналов выхода y и сигналов входов x_1 , x_2 , … , x_m . Прошлые значения всех указанных сигналов можно получить с помощью (m – 1) запаздывающих звеньев для каждого входа и выхода с передаточными функциями $e^{-\tau_1 s}$, $e^{-\tau_2 s}$, …, $e^{-\tau_{m-1} s}$. Можно использовать и другие динамические звенья, например, апериодические с передаточными функциями $1/(\tau_i s + 1)$, однако, использование чистого запаздывания более наглядно В результате совокупность текущих и (m - 1) прошлых значений выходов и входов позволяет получить m уравнений объекта для текущих и прошлых моментов времени

$$\left.\begin{aligned}
&y(t) = x_1(t)\, k_1 + x_2(t)\, k_2 + \ldots + x_m(t)\, k_m,\\
&y(t-\tau_1) = x_1(t-\tau_1)\, k_1 + x_2(t-\tau_1)\, k_2 + \ldots + x_m(t-\tau_1)\, k_m,\\
&y(t-\tau_2) = x_1(t-\tau_2)\, k_1 + x_2(t-\tau_2)\, k_2 + \ldots + x_m(t-\tau_2)\, k_m,\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&y(t-\tau_{m-1}) = x_1(t-\tau_{m-1})\, k_1 + x_2(t-\tau_{m-1})\, k_2 + \ldots + x_m(t-\tau_{m-1})\, k_m.
\end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

В векторной форме эта система может быть записана следующим образом:

$$X(t)\, \mathbf{k} = Y(t)\,, \qquad (5)$$

где $X(t)$- ($m \times m$) матрица входных воздействий объекта – текущих и (m – 1) прошлых,

$Y(t)$– вектор-столбец выходных сигналов объекта текущих и прошлых.

Системы (4) и (5) могут быть приведены к диагональному виду

$$\det X(t)\, \mathbf{k} = \{Adj X(t)\}\, Y(t) \qquad (6)$$

или, с использованием определителей формул Крамера, к отдельным уравнениям для каждого неизвестного параметра:

$$\Delta(t)\, k_i = \Delta_i(t)\,, \quad i = 1, 2, \ldots, m, \qquad (7)$$

где $\Delta(t) = \det X(t)$.- определитель матрицы $X(t)$,

$\Delta_i(t)$ - определитель, соответствующий коэффициенту k_i.

Формулы (7) показывают, что задача оценивания параметров исходного объекта (1) с m неизвестными параметрами сводится к задаче оценивания только одного неизвестного параметра в каждом из m объектов, которые имеют один вход и один выход. Все эти объекты имеют одинаковый вход $\Delta(t)$ и разные выходы $\Delta_i(t)$.

Для независимого оценивания какого-либо или всех неизвестных параметров согласно формуле (7) сформируем невязки вида (2)

$$\varepsilon_i\,(t) = \Delta_i(t) - \Delta(t)\,k_{ie}\,,\ \ i = 1, 2, \ldots, m,$$

где k_{ie} - оценка параметра k_i.

Далее, как обычно при идентификации одного параметра, можно сформировать скорости изменения оценок k_{ie} на основе минимизации текущего квадрата ошибки. В результате применения метода градиента получаем алгоритмы для скоростей независимой настройки оценок любого параметра k_i

$$dk_{ie}/dt = \lambda_i\cdot\,\varepsilon_i\,\Delta = \lambda_i\,(\Delta\,\Delta_i - \Delta^2\,k_{ie}). \qquad (8)$$

При достаточных спектральных составах и уровнях полезных составляющих сигналов x_i $(i = 1,2,\ldots,m)$ и достаточной длительности настройки (за счет выбора коэффициентов λ_i) выражения в скобках будут уменьшаться, обеспечивая стремление оценок к истинным значениям соответствующих параметров объекта. Реализация алгоритмов может быть видоизменена за счет умножения сигнала ошибки на знак Δ ($sign\Delta$), если минимизировать модуль ε_i [2].

При реализации полученных алгоритмов целесообразна постановка фильтров помех в сигналах y, x_i .Частотные характеристики этих фильтров для повышения точности могут учитывать спектральные особенности помех. При этом важно, чтобы частотные характеристики фильтров в цепях сигналов $\Delta(t)$ и $\Delta_i(t)$ были одинаковыми, чтобы в противном случае не привести к регулярным ошибкам в оценивании параметров вследствие различного изменения формы математических ожиданий процессов $\Delta(t)$ и $\Delta_i(t)$, содержащих помехи.

Требования точности и длительности оценивания противоречат друг другу при выбранных фильтрах. Это противоречие неустранимо и удовлетворительное решение может быть достигнуто экспериментальным выбором коэффициентов усиления λ_i с учетом особенностей и требуемой точности реальной системы, в которой должны использоваться получаемые оценки.

Отметим еще раз, что для рассмотренной задачи возможно использование вместо запаздывающих звеньев других инерционных звеньев, например, апериодических с различными постоянными времени. Это легко подтверждается практическими расчетами.

Предложенное решение может быть распространено и на более широкий класс статических объектов путем учета как постоянной, так и более высоких членов разложения нелинейной функции *y(x)*, что потребует дополнительных запаздывающих звеньев и цепей получения оценок параметров этих составляющих.

2.3. Пример оценивания неизвестных динамических коэффициентов самолета

Рассмотрим линеаризованное уравнение, связывающее нормальную перегрузку самолета с углом атаки и отклонением рулей высоты при малых углах скольжения

$$n_y = n_y^{\alpha}\alpha + n_y^{\delta}\delta_{в} + n_{yo}, \qquad (9)$$

где n_y – нормальная перегрузка, α - угол атаки, $\delta_{в}$ – угол отклонения рулей высоты, n_y^{α} , n_y^{δ}, n_{yo}- неизвестные динамические коэффициенты, подлежащие оцениванию в полете. Это оценивание необходимо для уточнения результатов продувок в аэродинамической трубе и для использования в алгоритмах управления самолетом.

Уравнение (9) соответствует статическому объекту (1) при постоянстве динамических коэффициентов и наличии датчиков сигналов нормальной перегрузки, угла атаки и угла отклонения рулей высоты.

Аналогично можно использовать в качестве уравнения статического объекта уравнение для поперечной перегрузки, зависящей от угла скольжения и угла отклонения руля направления

$$n_z = n_z^{\beta}\beta + n_z^{\delta}\delta_{н} + n_{zo},$$

где n_z – поперечная перегрузка, β - угол скольжения, $\delta_{н}$ – угол отклонения руля направления, n_z^{β}, n_z^{δ}, n_{zo} - неизвестные динамические коэффициенты, подлежащие оцениванию в полете.

Далее будем рассматривать только уравнение для нормальной перегрузки (9), полагая, что оцениваемые динамические коэффициенты практически постоянны на заданных режимах полета с постоянной скоростью *V* и высотой полета *H*. Для простоты решения будем оценивать только коэффициенты n_y^{α}, n_y^{δ}.

Для оценивания двух коэффициентов n_y^{α}, n_y^{δ} получим два уравнения путем исключения величины n_{yo}. Для этого пропустим все измеряемые сигналы через запаздывающие звенья с передаточными функциями $e^{-\tau_1 s}$ с временной задержкой, например, τ_1 =

0,2с. Вычитая из измеренных сигналов их задержанные значения, получим уравнение, не содержащее составляющей n_{yo}

$$\Delta n_y = n_y^{\alpha}\,\Delta\alpha + n_y^{\delta}\,\Delta\delta_в, \qquad (10)$$

где Δn_y, $\Delta\alpha$, $\Delta\delta_в$ – приращения измеренных сигналов за время 0,2с.

Для получения второго уравнения задержим все приращения на величины τ, например, равные 0,5с. В результате получим систему двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными

$$\Delta n_y = n_y^{\alpha}\,\Delta\alpha + n_y^{\delta}\,\Delta\delta_в,$$

$$\Delta n_{y\tau} = n_y^{\alpha}\,\Delta\alpha_{\tau} + n_y^{\delta}\,\Delta\delta_{в\tau}. \qquad (11)$$

Преобразуя эти уравнения с помощью определителей формул Крамера, получим отдельные уравнения для независимого оценивания каждого из коэффициентов

$$n_y^{\alpha}\,\Delta(t) = \Delta_{\alpha}(t)$$

$$n_y^{\delta}\Delta(t) = \Delta_{\delta}(t),$$

где $\Delta\,(t) = \Delta\alpha(t)\,\Delta\,\delta_{в\tau}(t) - \Delta\alpha(t)_{\tau}\;\delta_{в}(t),$

$\Delta_{\alpha}(t) = \Delta n_y\,(t)\,\Delta\,\delta_{в\tau}\;(t)\text{-}\;\Delta n_{y\tau}\,(t)\,\Delta\,\delta_{в}(t)$,

$\Delta_{\delta}(t) = \Delta\alpha(t)\;\Delta n_{y\tau}\,(t)\text{-}\;\Delta\alpha(t)_{\tau}\,\Delta n_y\,(t).$

Далее согласно (2) формируем невязки ε_{α}, ε_{δ}

$$\varepsilon_{\alpha} = \Delta_{\alpha}(t) - \Delta(t)\;n_{y\;e}^{\alpha},$$

$$\varepsilon_{\delta} = \Delta_{\delta}(t) - \Delta(t)\;n_{y\;e}^{\delta}, \qquad (12)$$

где $n_{y\;e}^{\alpha}, n_{y\;e}^{\delta}$ - оценки соответствующих коэффициентов n_y^{α}, n_y^{δ}.

Скорости настройки оценок $n_{y\;e}^{\alpha}$, $n_{y\;e}^{\delta}$ соответствующих коэффициентов n_y^{α}, n_y^{δ}, возьмем в виде

$$d\,n_{y\;e}^{\alpha}/dt = \lambda_{\alpha}\;\varepsilon_{\alpha}(t)\;sign\,\Delta(t),$$

$$d\,n_{y\;e}^{\delta}/dt = \lambda_{\delta}\;\varepsilon_{\delta}(t)\;sign\,\Delta(t). \qquad (13)$$

Проверку этих алгоритмов оценивания проведем их моделированием, приближенно учитывая связь перегрузки и угла атаки с углом отклонения рулей высоты согласно линеаризованным уравнениям продольного движения самолета при малых углах наклона траектории и измерении углов в градусах

$$d\theta/dt = Y_\alpha^\alpha\,\alpha + Y_\alpha^\delta\;\delta_в + Y_{\alpha o} - g\;57.3/V,$$

$$d\omega_z/dt = M_{zo} + M_z^{wz}\;\omega_z + M_z^{\dot\alpha}\;d\alpha/dt + M_z^\alpha\,\alpha + M_z^\delta\;\delta_в,$$

$$d\alpha/dt = \omega_z - d\theta/dt,$$

$$n_y = n_y^\alpha\,\alpha + n_y^\delta\,\delta_в + n_{yo}, \qquad (14)$$

$$n_y^\alpha = Y_a^\alpha\,V/(g57.3), \quad n_y^\delta = Y_a^\delta\,V/(g57{,}3), \quad n_{yo} = Y_{ao}\,V/(g57.3),$$

где Y_a^α, Y_a^δ, Y_{ao}, M_{zo}, $M_z^{wz}, M_z^{\dot\alpha}$, M_z^α, M_z^δ - динамические коэффициенты приведенных уравнений сил и моментов.

Схема моделирования продольного движения самолета в соответствии с системой уравнений (14) представлена на рис.1, где динамические коэффициенты самолета имеют значения

$M_{zo} = 11$, $M_z^\delta = -11$, $M_z^{wz} = -0.8$, $M_z^{\dot\alpha} = -0{,}1$, $M_z^\alpha = -6$, $Y_a^\delta = 0{,}1$, $Y_a^\alpha = 0{,}5$, V=562м/с,

$Y_{ao} - g\;57{,}3/V = 1$, $n_y^\alpha = 0{,}5$, $n_y^\delta = 0{,}1$.

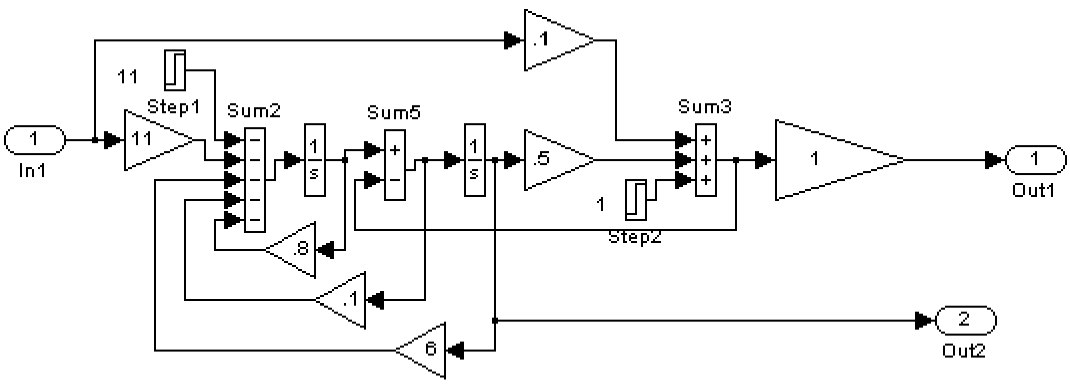

Рис.1. Схема моделирования продольного движения самолета.

Схема моделирования процессов оценивания коэффициентов n_y^α , n_y^δ приведена на рис.2, где Subsystem вычисляет определитель $\Delta(t)$**,** Subsystem 1 вычисляет определитель $\Delta_\delta(t)$. Sum 4 выдает результат вычисления определителя $\Delta_\alpha(t)$. Subsystem и Subsystem 1 имеют такую же структуру вычисления как и определителя $\Delta_\alpha(t)$.

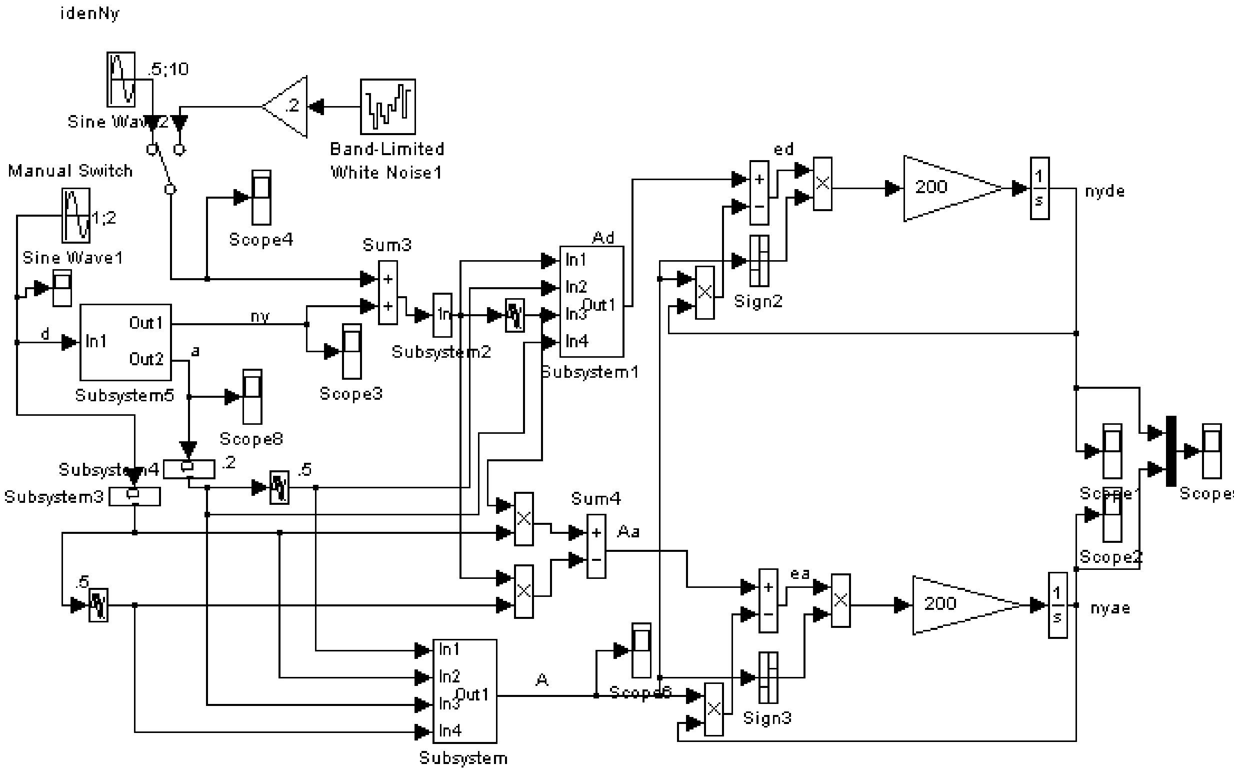

Рис.2. Схема моделирования процессов оценивания динамических коэффициентов самолета n_y^α , n_y^δ.

Блоки Subsystem 2-4 одинаковы. Они содержат фильтры помех с передаточными функциями

$$W(s) = 1/(s^2 + 3s + 4),$$

а также реализуют получение приращений сигналов на промежутке времени τ_1 = 0,2с.

Помеха в сигнале перегрузок принималась гармонической в виде $0.5sin(10t)$ (с амплитудой 0,5 ед. перегрузки и частотой 10). Входной сигнал отклонения рулей высоты принимался в виде $1sin(2t)$ (с амплитудой 1 град отклонения руля высоты и частотой 2). Значения коэффициентов λ_α, λ_δ приняты равными $\lambda_\alpha = \lambda_\delta = 200$.

В схеме моделирования рис.2 приняты обозначения: $a = \alpha$, $d = \delta_в$, $ny = n_y$,$A=\Delta$, $A_a = \Delta_\alpha$, $A_d = \Delta_\delta$, $ea = \varepsilon_\alpha$, $ed = \varepsilon_\delta$, $nyae = n_y^\alpha e$ – оценка коэффициента n_y^α , $nyde = n_y^\delta e$ – оценка коэффициента n_y^δ.

Процессы оценивания динамических коэффициентов самолета n_y^α , n_y^δ приведены на рис.3. Как видим, установившиеся усредненные значения оценок практически точно равны соответствующим величинам динамических коэффициентов самолета. Время оценивания составляет меньше 5с.

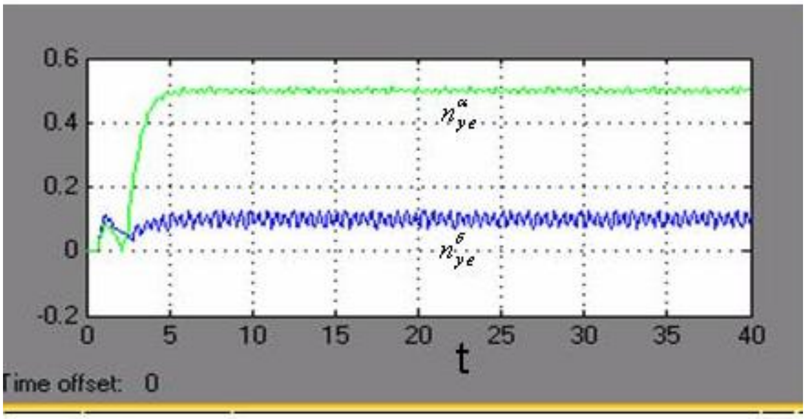

Рис.3. Переходные процессы оценивания динамических коэффициентов n_y^{α} , n_y^{δ}.

Таким образом, рассмотренный способ оценивания некоторых динамических коэффициентов самолета показывает возможность практического применения его для экспериментального оценивания динамических коэффициентов в реальных полетах.

3. Оценивание параметров динамических объектов

Предложенный способ оценивания параметров статических объектов может быть распространен и на динамические объекты заданной структуры в случае измерений или вычислений всех переменных состояния и управляющих воздействий, что, однако, приводит к некоторым структурным особенностям.

3.1. Постановка задачи

Пусть динамический объект математически описывается векторным линейным дифференциальным уравнением

$$dy/dt = A\,y + B\,x + C\,, \tag{15}$$

где y - n – мерный вектор переменных состояния; x – в общем случае m – мерный вектор управляющих воздействий, который без ограничения общности будем здесь считать скаляром, т. е. положим $m = 1$; A - $(n \times n)$ матрица ; B - $(n \times 1)$ матрица; C - $(n \times 1)$ матрица внешних воздействий.

Пусть измеряются все n составляющих вектора y, а также управляющее воздействие x, возможно с помехами.

Требуется сформировать систему непрерывного независимого оценивания какого-либо неизвестного параметра из матриц A, B, C в реальном масштабе времени с возможностью обеспечения требуемой точности оценивания при достаточном спектральном составе и уровнях полезных составляющих управляющих сигналов $x(t)$ по крайней мере для стационарных матриц A, B, C.

3.2. Решение задачи

Для решения поставленной задачи используем способ оценивания, аналогичный способу оценивания параметров статических объектов. Наглядность этой аналогии получается, если взять из уравнения (15) одну строку

$$dy_i/dt = a_{i1}\, y_1 + a_{i2}\, y_2 + \dots + a_{in}\, y_n + b_i\, x + c_i. \qquad (16)$$

В этом уравнении имеется $(n+2)$ или меньше неизвестных параметра, которые можно оценивать независимо от других параметров.

В отличие от способов, приведенных в [9], рассмотрим способ получения системы уравнений путем непрерывного интегрирования на некотором скользящем промежутке времени τ уравнения (16), предполагая неизвестные параметры постоянными

$$\Delta y_{i\tau} = a_{i1}\, Y_{1\tau} + a_{i2}\, Y_{2\,\tau} + \dots + a_{in}\, Y_{n\,\tau} + b_i\, X_{\tau} + c_i\, \tau,$$

где $\Delta y_{i\tau}$ - приращения координаты y_i на промежутках времени τ,

$Y_{1\tau} = \int y_1(t)dt,\ Y_{2\tau} = \int y_2(t)dt,\ \dots,\ Y_{n\tau} = \int y_n(t)dt,\ X_\tau = \int x(t)dt$ – приращения интегралов на тех же промежутках времени.

Если проводить интегрирование на $(n + 2)$ промежутках времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n+2}$, то получим систему $(n + 2)$ алгебраических уравнений относительно $(n + 2)$ неизвестных параметров объекта

$$\left.\begin{array}{l} \Delta Y_{i_1} = a_{i1}\cdot Y_{1_1} + a_{i2}\cdot Y_{2_1} + \dots + a_{in}\cdot Y_{n_1} + b_i\cdot X_1 + c_i\cdot \tau_1, \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \Delta Y_{i_{n+2}} = a_{i1}\cdot Y_{1_{n+2}} + a_{i2}\cdot Y_{2_{n+2}} + \dots + a_{in}\cdot Y_{n_{n+2}} + b_i\cdot X_{n+2} + c_i\cdot \tau_{n+2}. \end{array}\right\} \qquad (17$$

Эта система уравнений полностью аналогична системе (4) как для статического объекта. Ее решение, в том числе в условиях помех, может быть проведено тем же методом независимого оценивания каждого неизвестного параметра с помощью формируемых определителей (в виде текущих функций времени) и адаптивного деления их на основе невязок.

Как видим, задача идентификации динамических объектов сводится к задаче идентификации статических объектов, однако, здесь в этом способе дополнительно необходимы, кроме запаздывающих звеньев, интеграторы для получения текущих приращений

$$Y_{1\tau j},\ Y_{2\tau j},\ \dots,\ Y_{n\tau j},\ X_{\tau j}, \quad j = 1, 2, \dots, n+2.$$

.

4. Пример оценивания параметра динамического объекта с неполным вектором измерений

Распространение предложенных способов параметрической идентификации на случай объектов с неполным вектором измерений рассмотрим на примере оценивания коэффициента усиления или коэффициента измерителя выходной координаты объекта, описываемого двумя интегрирующими звеньями. Такой объект соответствует траекторному движению, например, летательных аппаратов, а решение задачи можно распространить на любое количество последовательно соединенных интегрирующих звеньев.

4.1. Постановка задачи

Пусть объект имеет следующие уравнения:

$$dy_1/dt = K\,x; \qquad (18)$$

$$dy/dt = y_1.$$

Здесь K - неизвестный коэффициент, подлежащий оцениванию.

Передаточная функция такого объекта имеет вид

$$W_o(s) = K/s^2.$$

Пусть измеряется входная величина $x(t)$ без помех и выходная величина $y\ (t)$ со случайной помехой $v(t)$, а координата y_1 не измеряется.

Требуется сформировать систему оценивания коэффициента K при произвольной ненулевой функции $x(t)$, произвольных начальных условиях $y_1(0)$, $y(0)$ и случайной помехе $v(t) = 5\,sin(\,5\,t + \varphi)$, где φ - равномерно распределенная случайная величина в пределах $0 - 2\pi$.

4.2. Решение задачи

На основе уравнений (18) получим аналитические выражения приращений выходной координаты $y(t)$ на промежутках времени $\tau_1,\ \tau_2$ с учетом неизвестного начального условия $y_1(0)$:

$$\Delta y_{\tau 1} = K \iint x(t)dt\,dt + \ y_1(0)\,\tau_1,$$

$$\Delta y_{\tau 2} = K \iint x(t)dt\,dt + \ y_1\,(0)\,\tau_2.$$

Запишем иначе

$$\left.\begin{aligned} X_{\tau 1}\, K + y_1(0)\, \tau_1 &= \Delta y_{\tau 1} \\ X_{\tau 2}\, K + y_1(0)\, \tau_2 &= \Delta y_{\tau 2}, \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

где $X_{\tau 1} = \iint x(t)dt\, dt$, $X_{\tau 2} = \iint x(t)dt\, dt$ –приращения двойных интегралов на промежутках времени τ_1, τ_2.

Систему алгебраических уравнений (19) относительно неизвестной K можно привести к одному уравнению

$$\Delta(t)\, K = \Delta_1(t),$$

где $\Delta_1(t) = \Delta y_{\tau 1}\, \tau_2 - \Delta y_{\tau 2}\, \tau_1$, $\Delta(t) = X_{\tau 1}\, \tau_2 - X_{\tau 2}\, \tau_1$.

Сформируем невязку $\varepsilon = \Delta_1(t) - \Delta(t)\, K_e$ и алгоритм настройки $dK_e/dt = \lambda\, \varepsilon\, \Delta(t)$.

Структурная схема моделирования системы оценивания представлена на рис.4, где $\Delta_1(t) = det(Y)$, $\Delta(t) = det(X)$.

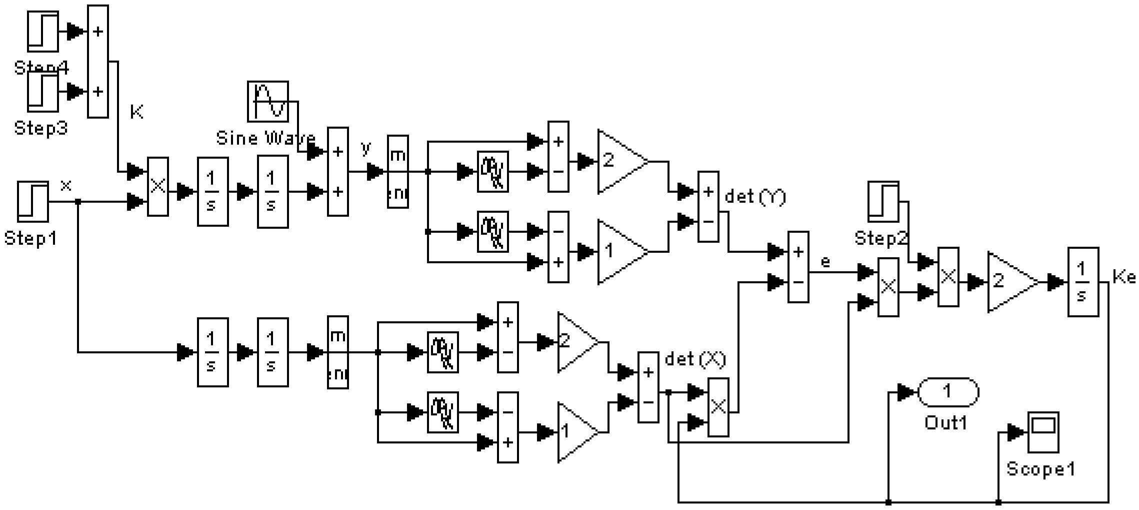

Рис.4. Структурная схема системы оценивания коэффициента K.

Зададим значения $x = 1$, $\tau_1 = 1$ с, $\tau_2 = 2$ с, $\lambda = 2$ и пропустим через фильтр-пробку с передаточной функцией $W(s) = (s^2 + 0\, s + 25)/(s^2 + 9\, s + 25)$ сигналы $y(t)$ и дважды проинтегрированный сигнал $x(t)$ для уменьшения влияния помехи на процесс оценивания.

На рис.5 приведен переходный процесс оценивания коэффициента K.

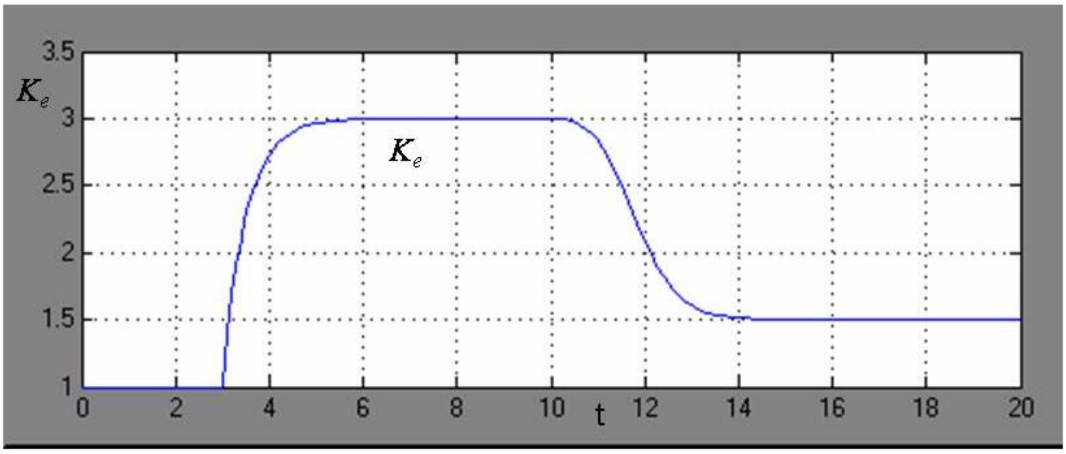

Рис.5. Переходный процесс оценивания коэффициента *K*.

Оценивание коэффициента *K*, не считая первых трех секунд, при которых не включена настройка, проходит за 2 с. с точностью до 3 % от установившегося значения, равного коэффициенту K = 3 при начальном значении оценки $K_e(0)$ =1 (см. рис.5). На рис.5 коэффициент объекта K на 10 секунде изменяет свое значение до уровня, равного 1.5. Соответственно, после переходного процесса длительностью около 3 с, оценка K_e принимает это же значение, что свидетельствует о возможности отслеживания переменных значений коэффициента *K*.

Заключение

Предложенные способы оценивания параметров статических и динамических объектов авиационных систем позволяют независимо от начальных условий и друг от друга непрерывно оценивать какой-либо или каждый параметр объекта в реальном масштабе времени. Это обеспечивает достаточную быстроту и точность оценивания при реальных уровнях помех, что позволяет рекомендовать их для практического применения.

Библиографический список

1. Гроп Д. Методы идентификации систем. - М.: Мир, 1979. - 302с.
2. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. - М.: Мир, 1975. -676с.
3. Теряев Е.Д., Шамриков Б.М. Цифровые системы и поэтапное адаптивное управление. - М.: Наука, 1999. -330с.
4. Шамриков Б.М. Идентификация, адаптация и управление в условиях неопределенности. - М.: Изд. МАИ, 2005. -289с.
5. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. - М.:Энергия, 1979.-240с.

6. Кирсанов Б.В. Похваленский В.Л. К вопросу идентифиации параметров движения самолетов // Труды МАИ, вып. №476. Вопросы исследования и проектирования СУ. 1979, с. 64-68.
7. Елисеев В.Д. Об одном способе построения самонастраивающейся системы с определением неизвестных параметров объекта управления. Известия ВУЗ-ов, Электромеханика, №11, 1968, с. 1247-1253.
8. Под ред. Красовского А.А. Справочник по теории автоматического управления. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат.-лит., 1987 – 712 с,
9. Елисеев В.Д., Похваленский В.Л., Котельникова А.В. Патент на изобретение № 2399078, Способ независимого оценивания неизвестных параметров линейных объектов, Бюл. изобр. № 25, 10.09.2010.