

УДК 621.396

ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.И. Павлов, В.В. Аксенов, Т.В. Белова

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

E-mail: vpavl@mail.ru

Рассмотрены вопросы адаптации измерительных систем к изменяющимся условиям функционирования путем одновременного управления структурой измерителей и процессом измерения.

Ключевые слова:

Измерения, адаптация, управление структурой.

Key words:

Measurements, adaptation, management of structure.

Под измерительной системой (ИС) понимается совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого пространства с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому пространству. При организации функционирования ИС наиболее трудной является адаптация к изменениям как внешней сигнально-помеховой обстановки, так и собственного внутреннего состояния. Вне зависимости от принципа действия, а также от того, является ли ИС измерительно-информационной, измерительно-контролирующей или измерительно-управляющей, изменения сигнально-помеховой обстановки обусловлены объективными причинами: воздействием естественных помех; изменением во времени контролируемого пространства и измеряемых физических величин; взаимными помехами измерительных приборов.

Изменчивость внутреннего состояния ИС связана, по крайней мере, с двумя обстоятельствами. Первое — необходимостью объединения в единую систему устройств, выполняющих одновременно, или на неперекрывающихся временных интервалах различные функции. Например, в радиотехнических системах (локация, навигация, связь) ИС объединяет устройства, выполняющие поиск, обнаружение, анализ и сопровождение измеряемого сигнала, реализующие принципиально отличающиеся режимы функционирования. Второе — различного рода нарушения функционирования (отказы). Нарушения функционирования могут быть вызваны рядом причин, таких как старение, износ, изменения температурного режима и др. Отказы, приводящие к скачкообразному изменению характеристик ИС, достаточно легко идентифицируются и могут быть учтены в процессе функционирования. Отказы, приводящие к постепенным изменениям, трудно идентифицируются и приводят к существенному искажению результатов измерений.

Наиболее полно учесть разнородные неблагоприятные факторы удастся при синтезе ИС в классе систем со случайной скачкообразной структу-

рой. Под такими системами понимаются наблюдаемые и управляемые в дискретные моменты времени стохастические динамические системы, структура которых имеет конечное число возможных состояний, сменяющих друг друга в случайные моменты времени [1]. Кроме того, скачки параметров в ИС можно также рассматривать как частный случай скачкообразного изменения структуры, когда связи между элементами системы не меняются, а каждому значению параметра соответствует свое состояние структуры.

ИС со случайной структурой удобно характеризовать номером структуры $s(k) \in \bar{S}$ и вектором состояния X_k . Учитывая то, что алгоритмическое обеспечение ИС ориентировано на цифровую вычислительную технику вектор X_k может быть дискретной случайной непрерывнозначной последовательностью, дискретной цепью или дискретным процессом [2]; номер s_k — дискретной последовательностью — цепью, принимающей значения на конечном счетном множестве $\bar{S}$.

Структура ИС следящего типа со случайными скачкообразными изменениями показана на рисунке в виде схемы подключения датчиков [1].

Математическая модель функционирования ИС как динамической дискретной нелинейной стохастической системы со случайной структурой может быть представлена в виде системы уравнений:

$$X_{k+1} = \Phi_{k,k+1}^{(s)} X_k + B_k^{(s)} U_k + F_k^{(s)} \xi_k; \quad (1)$$

$$Z_k = C_k^{(s)}(\mu_k, \gamma_k) X_k + N_k^{(s)} \zeta_k; \quad (2)$$

$$\mu_k = f_{k-1}^{(s)}(\mu_{k-1}, \gamma_k), \quad \mu_0 = \hat{\mu}_0, \quad k = \bar{1}, \bar{K}, \quad (3)$$

где $\Phi_{k,k+1}^{(s)}$ — переходная матрица состояния; $B_k^{(s)}$, $F_k^{(s)}$ — заданные матрицы с компонентами — функциями измеряемого вектора X_k ; U_k — вектор управления положением ИС в контролируемом пространстве относительно исследуемого объекта; $C_k^{(s)}(\mu_k, \gamma_k)$ — детерминированная матрица, зависящая от параметров μ_k и γ_k , определяющих условия измерения в s -й структуре; s — индекс, соответствующий номеру структуры ИС; $N_k^{(s)}$ — заданная матрица; ξ_k , ζ_k — векторы независимых центрированных дискретных гауссовских белых шумов с матрицами корреля-

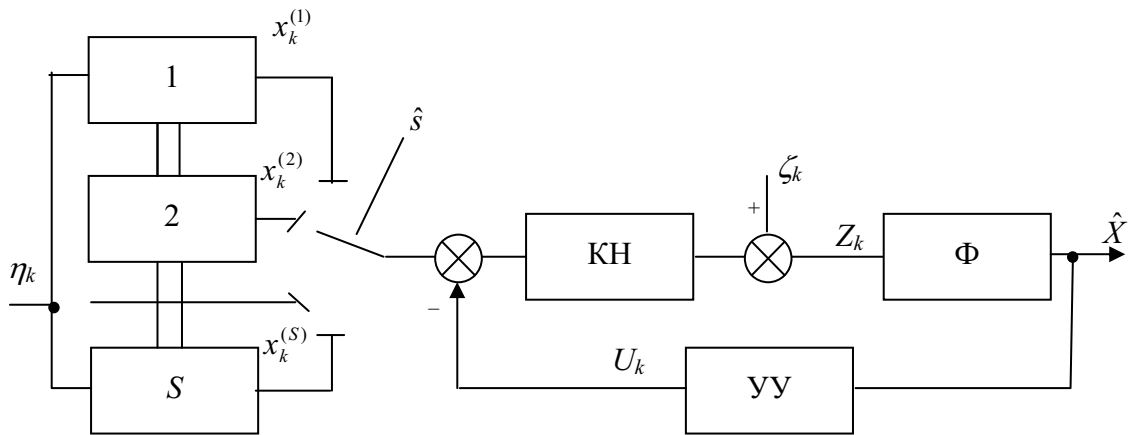


Рисунок. Структура измерительной системы следящего типа со случайными скачкообразными изменениями: η_k – входной сигнал ИС; 1, 2, ..., S – номера датчиков; $x_k^{(s)}$ – выходные сигналы датчиков; $\hat{s}$ – оценка s_k ; Z_k , $\hat{X}$, U_k – выходные сигналы канала наблюдения (КН), фильтра (Ф) и устройства управления (УУ); ζ_k – случайная помеха; $k = 1, 2, \dots, K$ – последовательность шагов счета

ционных функций $K_\xi(k, h) = G_k \delta_{kh}$ и $K_\zeta(k, h) = Q_k \delta_{kh}$ соответственно; δ_{kh} – функция Кронекера. Уравнение (3) описывает условия измерения в s -й структуре: μ_k – состав измеряемых параметров; γ_k – управление процессом измерения при ограничениях

$$\gamma_k \in \Gamma_K, \quad g(\mu_k) \leq \bar{g}; \quad (4)$$

функции $f_{k-1}^{(s)}(*)$, $g(*)$, величина $\bar{g}$ и множество Γ_K являются заданными.

Модель (1)–(3) описывает процедуру управления процессом измерения в ИС. В зависимости от конкретного вида управления $\{\gamma_k\}$ рассматриваются следующие задачи управления измерениями [3].

1. Выбор программы (режима) измерения.

В этом случае параметры γ_k и μ_k являются скалярными. Множество Γ_K состоит из двух элементов: $\Gamma_K = \{0, 1\}$, при этом $\gamma_k = 1$, если в момент k измерение производится, $\gamma_k = 0$ – если не производится. Уравнение (3) для s -й структуры принимает вид $\mu_k = \mu_{k-1} + \gamma_k$, $\mu_0 = 0$ с учетом ограничений

$$\mu_K = \sum_{k=1}^K \gamma_k \leq K_\Sigma, \quad \text{где } K_\Sigma \text{ – заданное число измерений.}$$

В уравнении (2) $C_k^{(s)}(\mu_k, \gamma_k) = \gamma_k C_k^{(s)}$, где $C_k^{(s)}$ – дискриминационная характеристика канала наблюдения в s -й структуре.

2. Выбор состава измеряемых параметров.

При выборе параметров для измерения ур. (3) формально записывается как $\mu_k = \gamma_k$, а дискриминационная матрица в (2) как $C_k^{(s)}(\mu_k, \gamma_k) = \mu_k$. Таким образом, матричное управление $\gamma_k \in D_K$ задает состав измеряемых параметров, а множество Γ_K – потенциально возможный их набор.

3. Выбор положения (траектории движения) ИС.

В некоторых случаях имеются дополнительные возможности для повышения эффективности измерительных средств за счет улучшения условий их эксплуатации. В этих случаях в (2) μ_k являются координатами X_k относительно положения ИС и исследуемого объекта, а γ_k – вектором управления U_k положением ИС. Множество Γ_K характе-

ризует энергетические возможности ИС. Ограничение (4) отражает требование на положение ИС в терминальный момент.

При выборе траектории движения ИС модель (1)–(3) будет иметь вид:

$$X_{k+1} = \Phi_{k,k+1}^{(s)} X_k + B_{k,k+1}^{(s)}(X_k) U_k + F_k^{(s)} \xi_k; \quad (5)$$

$$Z_k = C_k^{(s)}(X_k, U_k) X_k + N_k^{(s)} \zeta_k; \quad (6)$$

$$C_k^{(s)}(X_k, U_k) = C_{0k}^{(s)}(U_k) + \sum_{j=1}^n c_{jk}^{(s)}(U_k) X_k, \quad (7)$$

где $C_{0k}^{(s)}$ – статистическая характеристика нелинейной функции; $c_{jk}^{(s)}$ – коэффициенты статистической линеаризации по централизованному фазовым переменным; n – размерность вектора состояния X_k . Коэффициенты $C_{0k}^{(s)}$ и $c_{jk}^{(s)}$ вычисляются по известным правилам с использованием гауссовой аппроксимации апостериорной плотности вероятности [4]. В итоге эти коэффициенты зависят от управлений U_k , апостериорных математических ожиданий $\hat{X}_{jk}^{(s)}$ и корреляционных матриц G_k и Q_k .

В качестве дополнительной составляющей в модели (5)–(7) выступает процедура оптимизации управлений U_k в соответствии с предварительно обоснованным критерием. Так, например, если целью управления измерениями является повышение качества фильтрации, то «информационным» критерием являются средние потери

$$I(\hat{X}_k) = M[\Psi(X_k, \hat{X}_k)] = \sum_{s=1}^S \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(X_k, \hat{X}_k) \hat{p}_k(X) dX; \quad (8)$$

$$\Psi(X_k, \hat{X}_k) = \sum_{j=1}^n [X_{jk} - \hat{X}_{jk}]^2, \quad (9)$$

где $\Psi(X_k, \hat{X}_k)$ – квадратичная функция потерь; $\hat{p}_k(X)$ – апостериорная плотность вероятности вектора состояния X , а выходным сигналом устройства управления будет $U_k = X_k$.

Если целью управления является одновременное повышение качества фильтрации и улучшение характеристик измерения за счет изменения положения ИС, то возникает задача оптимизации движения ИС по обобщенному «информационно-механическому» критерию типа

$$J(\hat{X}_k) = \alpha I(\hat{X}_k) + \beta L(\hat{X}_k); \quad (10)$$

$$L(\hat{X}_k) = [\hat{X}_k - X_{\text{оп}}]^2, \quad (11)$$

где α и β – весовые коэффициенты, отражающие требования по точности оценивания вектора X и наилучшему расположению ИС относительно исследуемого объекта, $X_{\text{оп}}$ – вектор фазовых координат ИС относительно исследуемого объекта, при которых обеспечиваются наилучшие условия измерения. Решение данной задачи приводит к необходимости управления положением ИС по правилу

$$U_k = \begin{cases} U_{\text{max}}, & \text{при } U_k \geq U_{\text{max}}; \\ U_{\text{OC}}, & \text{при } U_k < |U_{\text{max}}|; \\ -U_{\text{max}}, & \text{при } U_k \leq -U_{\text{max}}, \end{cases}$$

где U_{OC} – особое управление, определяемое по методике согласно [5], физический смысл которого заключается в обеспечении положения ИС, компромиссного с точки зрения двух противоположных целей, отраженных в критерии (10).

Для одновременного обеспечения устойчивости при действии взаимных помех от различных датчиков и требуемого качества фильтрации оптимизация ИС должна осуществляться по «информационно-программному» критерию типа

$$F(\hat{X}_k) = I(\hat{X}_k) + M(\hat{X}_k, Z_k, U_k); \quad (12)$$

$$M(\hat{X}_k, Z_k, U_k) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(X_k, \hat{X}_k) \hat{p}_k(X) dX \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \phi_k^{(s)}(X, Z, U) \hat{p}_k^{(s)}(X) dX; \quad (13)$$

$$\phi_k^{(s)}(X, Z, U) = \sum_{l,q=1}^n \frac{\bar{Q}_{lq}^{(s)}}{Q^{(s)}} [Z_k - C_{lk}^{(s)}(\mu_k, \gamma_k) X_k] \times \\ \times [Z_k - C_{qk}^{(s)}(\mu_k, \gamma_k) X_k], \quad (14)$$

где l, q – индексы соответствующих составляющих вектора состояния ИС; $\bar{Q}_{lq}$ – алгебраическое дополнение элемента Q_{lq} в определителе $|Q|$ матрицы шу-

мов измерителя. В этом случае управление становится двухуровневым. Управление первого уровня определяется исходя из минимизации (13) для каждой s -й структуры, результатом чего является выбор целесообразного номера s , соответствующего сложившейся помеховой обстановке, и программы $f_{k+1}^{(s)}(\mu_k, \gamma_{k+1})$ для очередного шага. На втором уровне решается задача повышения качества фильтрации в соответствии с критерием (9).

Оценка вектора состояния ИС может быть получена на основании апостериорной плотности вероятности. Апостериорная плотность вероятности $\hat{p}_k^{(s)}(X)$ вектора состояния ИС в s -й структуре определяется с помощью формулы Байеса на основании априорной плотности вероятности $p_k^{(s)}(X)$ и измерения Z_k

$$\hat{p}_k^{(s)}(X) = \frac{p^{(s)}(X) \exp[-0,5 \Delta t \varphi_k^{(s)}(X, Z, U)]}{\sum_{s=1}^S \int_{-\infty}^{\infty} p^{(s)}(X) \exp[-0,5 \Delta t \varphi_k^{(s)}(X, Z, U)] dX}, \quad (15)$$

где $\Delta t = t_k - t_{k-1}$, а $\varphi_k^{(s)}(X, Z, U)$ вычисляется по формуле (14). Вычисление апостериорной плотности вероятности $\hat{p}_k^{(s)}(X)$ на основании формулы (15) может быть выполнено по аналогии с [6]. Для вычисления $\hat{s}$ в реальном масштабе времени необходимо задать априорные значения $p_k^{(s)}(X)$, которые определяются исходя из конкретных физических особенностей функционирования ИС. Определение $\hat{s}$, соответствующей сложившейся в текущий момент времени помеховой обстановке, осуществляется по критерию

$$\hat{s} = \arg \max \{ \hat{p}_k^{(s)}(X) \}. \quad (16)$$

Таким образом, управление потоком входной информации ИС в соответствии с рисунком, обоснование и выбор критерия управления ИС (8, 9), (10, 11) или (12, 13), возможность расчета апостериорных характеристик расширенного вектора состояния $\{X_k, s_k\}$ методами теории систем со случайной скачкообразной структурой и определение складывающейся помеховой обстановки по критерию (16) позволяют адаптировать к изменяющимся условиям как структуру, так и способ обработки информации в ИС с единых позиций.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ, грант № 09-08-00570-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков И.Е., Артемьев В.М. Оптимизация динамических систем случайной структуры. – М.: Наука, 1980. – 382 с.
2. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Советское радио, 1977. – 578 с.
3. Малышев В.В., Красильщиков М.Н., Карлов В.И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
4. Казаков И.Е. Методы исследования нелинейных автоматических систем, основанные на статистической линеаризации. – М.: Машиностроение, 1967. – 238 с.
5. Казаков И.Е. Статистические методы проектирования систем управления. – М.: Машиностроение, 1969. – 260 с.
6. Pavlov V.I. Automation of the monitoring and controlling of the state of complex technical systems // Chemical and Petroleum Engineering. – 1997. – № 3. – P. 278–280.

Поступила 14.05.2010 г.