

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ НА ПОДВИЖНЫЕ ОБЪЕКТЫ

**В.И. Павлов, В.В. Аксенов, Т.В. Аксенова**

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; avaks\_68@bk.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором Д.Ю. Муромцевым*

**Ключевые слова и фразы:** адаптация; измерения; управление структурой.

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы адаптации измерительных систем, устанавливаемых на подвижные объекты, к изменяющимся условиям функционирования путем одновременного управления структурой измерителей и процессом измерения.

---

Подвижные объекты – это сухопутные транспортные средства, морские, воздушные и космические суда, оснащенные техническими комплексами навигации, радиолокации, гидроакустики и другими, воспринимающими информацию соответствующих измерительных систем.

Под измерительной системой (ИС) понимается совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещаемых на подвижных объектах, с целью измерений одной или нескольких физических величин, соответствующих фазовым координатам объектов. 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:

1) 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;

2) 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 изме-

нениям, трудно идентифицируются и приводят к существенному искажению результатов измерений.

Наиболее полно учесть разнородные неблагоприятные факторы удается при синтезе ИС в классе систем со случайной скачкообразной структурой. 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.

Измерительную систему со случайной структурой удобно характеризовать номером структуры  $s(k) = \overline{1, S}$  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  $\overline{1, S}$ .

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

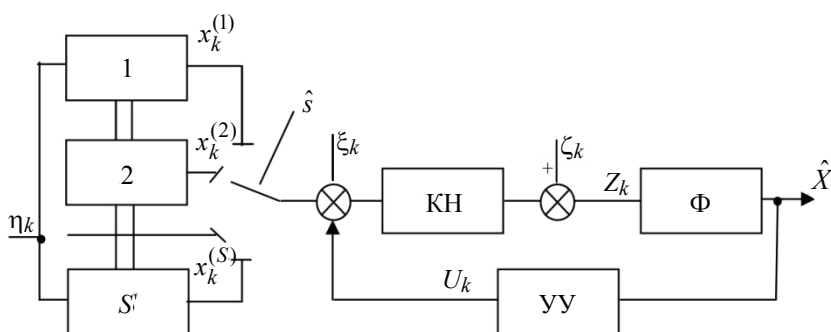
Математическая модель функционирования ИС как динамической дискретной нелинейной стохастической системы со случайной структурой может быть представлена в виде системы уравнений:

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

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

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

где  $\Phi_{k,k+1}^{(s)}$  – переходная матрица состояния;  $B_k^{(s)}$ ,  $F_k^{(s)}$  – заданные матрицы с компонентами – функциями измеряемого вектора фазовых координат подвижного



**Структура измерительной системы следящего типа со случайными скачкообразными изменениями:**

$\eta_k$  – 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);  $\zeta_k$  – случайная помеха;  $k = 1, 2, \dots, K$  – последовательность шагов счета

объекта  $X_k$ ;  $U_k$  – вектор управления положением подвижного объекта;  $C_k^{(s)}(\mu_k, \gamma_k)$  – детерминированная матрица, зависящая от параметров  $\mu_k$  и  $\gamma_k$ , определяющих условия измерения в  $s$ -й структуре;  $s$  – индекс, соответствующий номеру структуры ИС;  $N_k^{(s)}$  – заданная матрица;  $\xi_k, \zeta_k$  – векторы независимых центрированных дискретных гауссовских белых шумов с матрицами корреляционных функций  $K_\xi(k, h) = G_k \delta_{kh}$  и  $K_\zeta(k, h) = Q_k \delta_{kh}$  соответственно;  $\delta_{kh}$  – функция Кронекера. Уравнение (3) описывает условия измерения в  $s$ -й структуре:  $\mu_k$  – состав измеряемых параметров;  $\gamma_k$  – 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  $\Gamma_k$  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  $\gamma_k$  и  $\mu_k$  являются скалярными. Множество  $\Gamma_k$  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

$$\mu_k = \mu_{k-1} + \gamma_k, \quad \mu_0 = 0 \text{ с учетом ограничений } \mu_K = \sum_{k=1}^K \gamma_k \leq K_\Sigma,$$

где  $K_\Sigma$  – 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 уравнение (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  $\Gamma_k$  – 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 уравнении (2)  $\mu_k$  являются фазовыми координатами  $X_k$  подвижного объекта, а  $\gamma_k$  – вектором управления  $U_k$  положением объекта и, соответственно, ИС. Множество  $\Gamma_k$  характеризует энергетические возможности ИС. Ограничение (4) отражает требование на положение ИС в терминальный момент.

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

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

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

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

где  $C_{0k}^{(s)}$  – статистическая характеристика нелинейной функции;  $c_{jk}^{(s)}$  – коэффициенты статистической линеаризации по центрированным 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 только 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  $U_k = \hat{X}_k$ .

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  $\alpha$  и  $\beta$  – 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 оптимальные 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  $U_{\text{oc}}$  – 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:

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

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

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

где  $l, q$  – индексы соответствующих составляющих вектора состояния ИС;  $\overline{Q}_{lq}$  – алгебраическое дополнение элемента  $Q_{lq}$  в определителе  $|Q|$  матрицы шумов 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 [6]. 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). Упрощенный пример построения рекуррентного алгоритма расчета апостериорной плотности вероятности  $\hat{p}_k^{(s)}(X)$  на основании формулы (15) и определения  $\hat{s}$ , соответствующей сложившейся в текущий момент времени помеховой обстановки, приведен в [7].

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

*Статья подготовлена при поддержке РФФИ, грант № 10-08-00555-а, грант № 12-08-00352-а.*

#### *Список литературы*

1. Казаков, И.Е. Оптимизация динамических систем случайной структуры / И.Е. Казаков, В.М. Артемьев. – М. : Наука, 1980. – 382 с.
2. Тихонов, В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М. : Советское радио, 1977. – 578 с.
3. Малышев, В.В. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов / В.В. Малышев, М.Н. Красильщиков, В.И. Карлов. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.
4. Казаков, И.Е. Методы исследования нелинейных автоматических систем, основанные на статистической линеаризации. Современные методы проектирования систем управления / И.Е. Казаков. – М. : Машиностроение, 1967. – 238 с.

5. Казаков, И.Е. Статистические методы проектирования систем управления / И.Е. Казаков. – М. : Машиностроение, 1969. – 260 с.

6. Павлов, В.И. Разработка и обоснование модели помехоустойчивой информационной системы подвижного управляемого объекта : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01, 05.13.18 : защищена 05.02.1998 : утв. 11.06.1998 / Павлов Владимир Иванович. – Воронеж, 1998. – 371 с.

7. Pavlov, V.I. Automation of the Monitoring and Controlling of the State of Complex Technical Systems / V.I. Pavlov // Chemical and Petroleum Engineering. – 1997. – № 3. – P. 278–280.

---

## Optimization of Measuring Systems Installed on Mobile Objects

V.I. Pavlov, V.V. Aksenov, T.V. Aksenova

*Department "Design of Radio Electronic and Microprocessor Systems", TSTU;  
avaks\_68@bk.ru*

**Key words and phrases:** adaptation; measurements; structure management.

**Abstract:** The paper explores the issues of adaptation of measuring systems installed on mobile objects to changing operating conditions by simultaneous management of measuring instruments structure and measurement process.

---

## Optimierung des Funktionierens der auf die beweglichen Objekte aufstellenden Messsysteme

**Zusammenfassung:** Es sind die Fragen der Anpassung der auf die beweglichen Objekte aufstellenden Messsysteme zu den sich ändernden Bedingungen des Funktionierens mittels der gleichzeitigen Steuerung von der Struktur der Messgeräte und dem Prozess der Messung betrachtet.

---

## Optimisation du fonctionnement des systèmes de mesure établis sur les objets mobiles

**Résumé:** Sont examinées les questions de l'adaptation des systèmes de mesure établis sur les objets mobiles envers les conditions du fonctionnement par la voie de la commande simultanée de la structure des mesureurs et du processus de la mesure.

---

**Авторы:** *Павлов Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Аксенов Виктор Владимирович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Аксенова Татьяна Викторовна* – аспирант, ассистент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Шамкин Валерий Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».