

УДК 681.3

ОДНОКАНАЛЬНЫЙ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Качур С.А.

Предложен рекуррентный линейный одноканальный фильтр, основанный на методах имитационного моделирования сетями Петри. Рассмотрена процедура фильтрации совокупности дискретных процессов, отражающих случайный характер подключения нескольких измерительных систем к одному каналу.

Оптимальная фильтрация процессов случайной вероятностной структуры обычно осуществляется на основе приближенных методов, дающих квазиоптимальное решение. В условиях негауссовской статистики наиболее часто применяется гауссово приближение [1]. Для немарковских процессов приближенным способом, позволяющим получить достаточно просто оценки апостериорных вероятностей структур, функций апостериорных плотностей состояний и матрицы ковариаций сложных систем переменной случайной структуры является имитационное моделирование на базе сетей Петри (СП).

На практике встречаются ситуации, когда необходимо передавать информацию от нескольких источников по одному каналу связи [1]. Задачи такого рода встречаются в системах космической связи, когда количество датчиков на борту значительно превышает число телеметрических каналов связи и по каждому из них приходится последовательно передавать информацию от нескольких источников

Рассмотрим применение метода оптимальной фильтрации на базе СП

для случая, когда неизвестны моменты подключения измерительных систем (ИС) к каналу связи, а также когда между параллельно независимо функционирующими системами обработки и передачи информации существуют локальные связи.

Обозначим совокупность всех выходных процессов ИС как $X(t)$

$$X(t) = \{X^{(1)}(t), X^{(2)}(t), \dots, X^{(S)}(t)\}, \quad X^{(i)}(t) \subseteq Y^{(i)},$$

где $Y^{(i)}$ – множество фазовых координат i -й стохастической системы.

Будем считать, что вектор $X(t)$ описывает дискретный немарковский случайный процесс.

Элемент l множества стохастических систем является инерционным с минимальной задержкой функционирования Δt и описывается стохастическим уравнением

$$\dot{Y}^l = D^{(l)}(t)\varphi^{(l)}(Y, t) + W^{(l)}(Y, t)F^{(l)}(t) + H^{(l)}(Y, t)V(t),$$

$$Y(t_0) = Y_0, \quad l = \overline{1, n},$$

где $Y^{(l)}(t)$ – k_l -мерный вектор фазовых координат; $D^{(l)}(t)$ – $(k_l \times k_l)$ -матрица заданных коэффициентов; $\varphi^{(l)}(Y, t)$ – k_l -мерный вектор нелинейных функций; $W^{(l)}(Y, t)$ и $H^{(l)}(Y, t)$ – $(k_l \times k_l)$ -матрицы известных дифференцируемых по Y функций; $F^{(l)}(t)$ – k_l -мерный вектор входных сигналов; $V(t)$ – k_l -мерный вектор гауссовского белого шума.

Структура q -ой стохастической системы, т.е. источника информации, включает b_q элементов, имеющих между собой вероятностные связи.

Измеритель будем считать линейным и безынерционным. Измерения проводятся через интервал времени Δt . Уравнения наблюдения

записываются в виде m -мерного вектора $Z(t) (m < n_1, n_1 = \sum_{i=1}^n k_i)$, где k_i – количество выходов i -го элемента)

$$Z(t) = C(t)X(t) + N(t),$$

где $C(t)$ – $(m \times n_1)$ -матрица измерения фазовых координат $X(t)$; $N(t)$ – m -мерный вектор гауссовского белого шума.

Пример двух стохастических систем D_1 и D_2 , определяющих процессы $X^{(1)}(t)$ и $X^{(2)}(t)$, имеющих локальную связь и поступающих на вход одного канала наблюдения случайным образом в неизвестные моменты времени, изображен на рисунке 1. Дугам сопоставлены вероятности связей. Элемент q -ой ($q=1,2$) системы $SS_l(l=1, b_q)$ описывается уравнением (1).

Задача состоит: а) в определении ИС, которая подключена в текущий

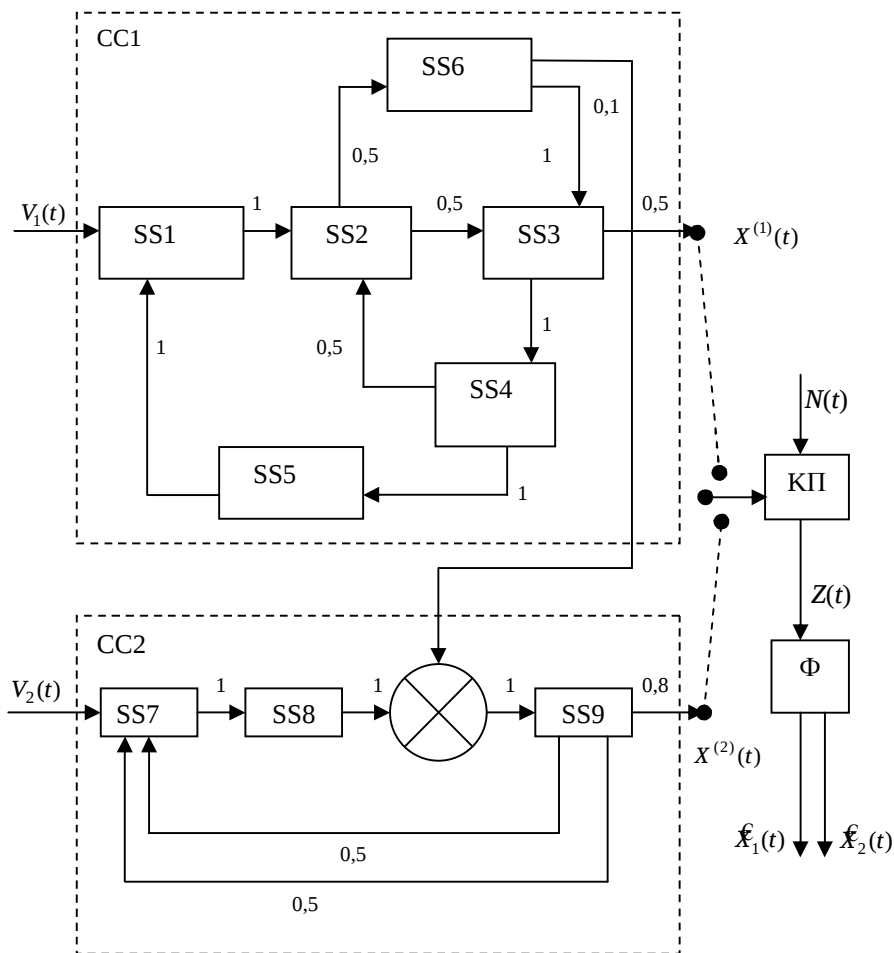


Рисунок 1 – Последовательная фильтрация двух процессов случайной структуры с локальной связью

момент времени к каналу; б) в выделении полезного сигнала, передаваемого от ИС.

Основная особенность одноканального фильтра по сравнению с многоканальным фильтром на базе СП заключается в необходимости одновременного моделирования q стохастических систем (СС), определения для каждой из них наиболее вероятной помехи $\hat{N}^{(q)}(t)$ и оценки выходного сигнала канала передачи $\hat{X}(t)$. Кроме этого, фильтр должен включать блок идентификации ИС.

Структурная схема одноканального квазиоптимального фильтра на базе СП показана на рисунке 2.

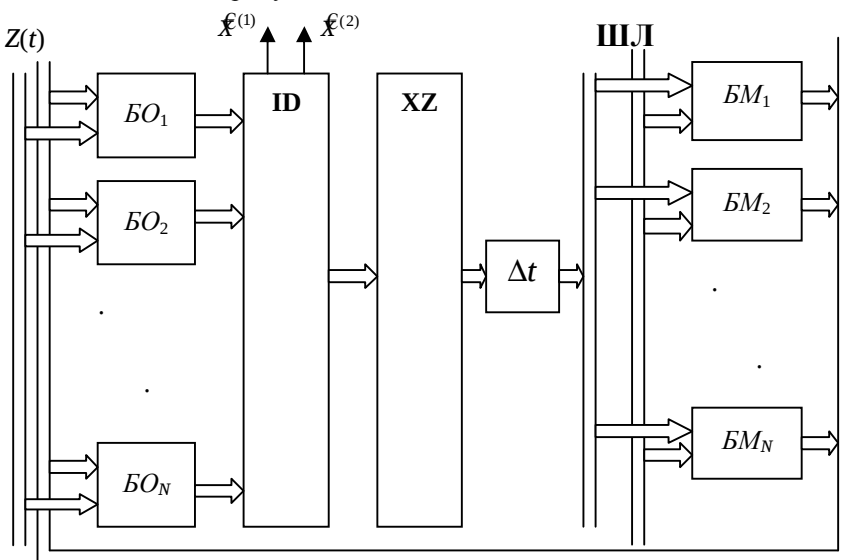


Рисунок 2 – Структурная схема одноканального квазиоптимального фильтра на основе сетей Петри

Поскольку СС инерционна, то моделирование сигнала $X_{\text{mod}}^{(q)}$ и помехи

$\hat{N}^{(q)}$ производится с задержкой Δt . Исходной информацией для блока

моделирования $БМ D_q$ q -ой СС является оценка $\hat{X}^{(q)}(t - \Delta t)$, рассчитанная

в предыдущем такте моделирования, и внешние помехи типа гауссовского белого шума. Предполагается, что такт моделирования значительно меньше времени передачи информации от ИС по каналу связи.

Результаты фильтрации и результаты моделирования помещаются в регистр XZ . Блок идентификации ID определяет разряды регистра XZ , в которые помещаются результаты фильтрации, в остальные разряды доопределяются результатами моделирования. В процессе моделирования (блоки BMD_q ($q = \overline{1, s}$)) производится расчет для каждой СС следующих параметров:

- 1) оценок вероятностей $\hat{p}_i^{(q)}(t) (i = \overline{1, k^{(q)}})$ для различных структур
- 2) вектора оценки выходных сигналов $\hat{\mathbf{r}}^{(q)}(t)$ элементов $SS_j^{(q)}$ ($j = \overline{1, b_q}$);
- 3) матрицы $(b_q \times b_q)$ ковариаций $\hat{\mathbf{R}}^{(q)}$, элементы диагонали которой определяются мерой размаха значений выходных сигналов ($R_{ij} = 0, i \neq j$);
- 4) вектора значений моделируемых сигналов $X_{\text{mod}}^{(q)}(t)$ на выходах элементов $SS_j^{(q)}$ ($j = \overline{1, b_q}$);
- 5) апостериорных вероятностей связей между элементами СС, в том числе вероятность $pp^{(q)}(t)$ связи с каналом передачи (КП);
- 6) вектора оценки моделируемых выходных сигналов

$$\hat{\mathbf{X}}_{\text{mod}}^{(q)} = pp^{(q)}(t) \sum_{i=1}^{K^{(q)}} \hat{p}_i^{(q)}(t) \hat{\mathbf{r}}^{(q)}(t);$$

- 7) вектора вероятности моделируемой помехи для текущей структуры q -ой СС

$$K(t) = \hat{p}_{\text{TEK}}^{(q)}(t) \hat{G}_{\text{TEK}}^{(q)}(X_{\text{mod}}, t) pp^{(q)}(t),$$

где $\hat{G}_{\text{TEK}}^{(q)}(X_{\text{mod}}, t)$ – функция плотности вероятности значений моделируемых выходных сигналов $X_{\text{mod}}^{(q)}(t)$ в момент времени t , распределенных по нормальному закону с математическим ожиданием $\hat{\mathbf{r}}^{(q)}(t)$ и дисперсией, определенной ковариационной матрицей $\hat{\mathbf{R}}^{(q)}$.

На основе информации блоков BMD_q ($q = \overline{1, s}$) в блоках оценки BO_q формируются

- 1) оценка наиболее вероятной помехи $\hat{\mathbf{N}}^{(q)}$, которая будет учтена в следующем такте моделирования

$$\hat{\mathbf{N}}^{(q)}(t) = \mathbf{Z}(t) - (\mathbf{E} - \mathbf{K}'(t))\hat{\mathbf{X}}_{\text{mod}}^{(q)} - \mathbf{K}'(t)\mathbf{X}_{\text{mod}}^{(q)},$$

где $\mathbf{K}'(t)$ – матрица, на главной диагонали которой находятся элементы вектора $\mathbf{K}(t)$ ($K'_{i,i}(t) = K_i(t), K_{i,j} = 0, i \neq j$);

- 2) оценка возможного выходного сигнала канала передачи с учетом коррекции

$$\hat{\mathbf{X}}_{\text{ПРОБА}}^{(q)}(t) = \mathbf{Z}(t) - \mathbf{A}\hat{\mathbf{N}}(t - \Delta t) - \Delta\hat{\mathbf{N}}(t - \Delta t),$$

где
$$\mathbf{A} = \begin{cases} 1, & \text{если } (\Delta\mathbf{Z}(t) \cdot \Delta\mathbf{Z}(t - \Delta t) \geq 0), \\ 0, & \text{если } (\Delta\mathbf{Z}(t) \cdot \Delta\mathbf{Z}(t - \Delta t) < 0). \end{cases}$$

Полученные значения $\hat{\mathbf{X}}_{\text{ПРОБА}}^{(q)}(t)$ поступают в блок идентификации ID , который определяет номер SI передающей ИС.

Если

$$(\hat{\mathbf{X}}_{\text{mod}}^{(q)}(t) - \hat{\mathbf{X}}_{\text{ПРОБА}}^{(q)}(t))(\hat{\mathbf{X}}_{\text{mod}}^{(q)}(t) - \hat{\mathbf{X}}_{\text{ПРОБА}}^{(q)}(t))^T < \hat{\mathbf{K}}^{(q)}(t)\mathbf{I},$$

где $\mathbf{I}$ – единичный вектор, то

$$\hat{\mathbf{X}}^{(q)}(t) = \hat{\mathbf{X}}_{\text{ПРОБА}}^{(q)}, \quad SI = q.$$

Предполагается, что множество значений на выходах ИС не пересекается, т.е. сигналы независимы, хотя между СС могут существовать локальные связи, определенные на структурной схеме фильтра (рисунок 2) шиной $ШЛС$.

Дисперсия фильтрации определяется по формуле

$$\hat{\mathbf{K}}(t) = \sum_q pp^{(q)}(t)\hat{\mathbf{K}}^{(q)}(t).$$

Оценка процесса в целом рассчитывается следующим образом:

$$\hat{\mathbf{X}}(t) = \sum_q pp^{(q)}(t)\hat{\mathbf{X}}_{\text{ПРОБА}}^{(q)}(t).$$

Процедура фильтрации является рекуррентной, позволяющей рассматривать работу множества СС различной сложности с учетом вероятностных связей между ними и выполнять выделение полезной информации при их случайном подключении.

Библиография

- 1 Казаков И.Е. Оптимизация динамических систем случайной структуры/ И.Е.

Казаков, В.М. Артемьев. — М.: Наука, 1980. — 384 с.

- 2 Лескин А.А. Сети Петри в моделировании и управлении / А.А. Лескин, П.А. Мальцев, А.М. Спиридонов. — Л.: Наука, 1989. — 133 с.

Поступила в редакцию 16.11.2001 г.