связи и управлении.-М.:Связь, 1976.

2. Михайлов С.В., Сойфер В.А. Анализ алгоритма восстановления поля по данным многоканальной регистрации.-В сб.:Вопросы кибернетики. Автоматизация экспериментальных исследований.-М., 1979, с.45-55.

3. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы.-М.:Наука, 1977.

4. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики.-М.:Наука, 1980.

УДК 681.325.36

В.А.Смирнов

ФОРМИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ШУМОВ В СИСТЕМЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

(г.Ленинград)

В настоящее время широко используются статистические методы моделирования при анализе и синтезе сложных систем, работающих в условиях различного рода помех как внутренних, так и внешних. Система комплексного моделирования динамических объектов, реализуемая на технических средствах аналоговой и цифровой вычислительной техники, включает в себя реальный элемент исследуемой системы. Разработка и эксплуатация таких систем позволяет решать как исследовательские, так и задачи испытаний серийных образцов реальных элементов. Ввод в систему реального элемента приводит к необходимости организации реального масштаба времени, что представляет собой сложную задачу в связи с естественными ограничениями ресурсов технических средств при необходимости обеспечения малой погрешности моделирования.

На этапе распределения функциональных модулей динамического объекта в системе комплексного моделирования и получения предварительных временных оценок и оценок загрузки памяти ЦВМ может возникнуть ситуация, когда некоторые модули нереализуемы с допустимой точностью в реальном масштабе времени на заданном комплексе технических средств. В таком случае одним из вариантов является

разработка общей аналитической модели этой группы модулей и ее реализация посредством специальных аппаратных или программных средств с целью разгрузки цифровой части системы. Подходящими объектами представляются системы, которые включают в себя тракт преобразования случайного поля $\xi(X,\alpha)$, где $\alpha=\alpha(t)$ – вектор параметров, в одномерный случайный процесс $\Psi(t)$. Преобразование поля производится последовательно во времени пространственно-временным фильтром с обобщенной пространственно-частотной характеристикой $H(\omega,\beta,\omega)$,
где ω – вектор пространственной частоты, ω – циклическая частота, β – вектор параметров; причем анализируемая область поля смещается во времени по траектории $R(t)$. Общая теория таких систем, названных подвижными анализаторами изображения, дана в работе [I] на базе обобщенного частотного метода.

Программная реализация тракта преобразования поля $\xi(X,\alpha)$, построенная по принципу имитационного моделирования, включает в себя модуль формирования случайного поля и модуль пространственно-временного фильтра, что при размерности X больше двух требует значительных затрат удельного времени реализации.

Аналитическая модель тракта должна устанавливать соответствие между параметрами поля α, параметрами пространственно-временного фильтра β, траекторией $R(t)$ и выходным случайным процессом $\Psi(t)$, приблизительно равным идеальному процессу $\Psi(t)$ в смысле выбранного критерия адекватности. Согласно корреляционной теории в качестве критерия обычно выбирается среднеквадратическое отклонение нестационарной автокорреляционной функции от идеальной $K_\psi(t_1,t_2)$, соответствующей процессу $\psi(t)$:

$$\mathcal{E}_1=\sqrt{\int_0^\infty\int_0^\infty[K_\Psi(t_1,t_2)-K_\varphi(t_1,t_2)]^2dt_1dt_2\Big/\int_0^\infty\int_0^\infty K_\psi(t_1,t_2)^2dt_1dt_2}, \quad (\text{I})$$

$$\mathcal{E}_2=\sqrt{\int_0^\infty[K_\psi(\tau)-K_\varphi(\tau)]^2d\tau\Big/\int_0^\infty K_\psi(\tau)^2d\tau}. \quad (2)$$

Особенностью рассматриваемого класса систем является смещение анализируемой области поля по траектории $R(t)$, которое приводит к нестационарности процесса $\Psi(t)$ даже при условии изотропности поля и стационарности остальных параметров. При известной траектории аналитическая модель представляется в виде нестационарного формирующего фильтра, синтез которого представляет собой сложную задачу. В действительности траектория $R(t)$ может зависеть не тольк(

от времени, но и от фазовых координат моделируемого объекта и быть априори неизвестной. В таком случае аналитическая модель должна учитывать текущую информацию о траектории $R(t)$, появляющуюся в ходе моделирования.

Пусть траектория задана текущими отсчетами $R(t_K)=R[K]$ с шагом $\Delta t = t_{KH} - t_K$. Представим $R(t)$ через $R[K]$ и интерполирующую функцию $C(t)$:

$$R^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} R[n]C(t - \sum_{m=0}^{n-1} T_m), \tag{3}$$

где $C(t) = \begin{cases} 1 & (0 \le t \le T_m \\ 0 & (t<0,\ t>T_m \end{cases}$, $T_m = j\Delta t$, $j = 1, 2, \ldots J$.

Рассмотрим аналитическую модель процесса $\Psi(t)$, определяемую конечным числом узлов интерполяции $R[n-1], R[n-2], .. R[n-z]$, предшествующих текущему интервалу интерполяции $(t_n, t_n + T_n)$,

$$\varphi(t) = F[\alpha, \beta, R[n-1], R[n-2], \ldots, R[n-z], \gamma, t], \tag{4}$$

где γ - вектор параметров модели.

Случайный процесс $\eta_{ni}(t)$ соответствует фиксированному отсчету траектории $R[n-i]$ и интерполирующей функции $C(t)$. Для широкого класса систем с периодической обработкой поля $\xi(X,\alpha)$, при условии кратности интервала интерполяции T_n периоду обработки Δt, $h_{ni}(t,\alpha,\beta)$ представляет собой периодическое повторение своей реализации j раз. Совокупность случайных процессов $h_{ni}(t,\alpha,\beta)$ в соответствии с (4) можно рассматривать как случайный векторный процесс

$$H_n(t,\alpha,\beta) = (h_{n0}(t,\alpha,\beta), h_{n1}(t,\alpha,\beta), \ldots, h_{nz}(t,\alpha,\beta))^T \tag{5}$$

с периодическими компонентами и корреляционной матрицей $B_n(t_1,t_2,\alpha,\beta)$

$$B_n(t_1,t_2,\alpha,\beta) = B_n(t_1+\Delta t, t_2+\Delta t, \alpha, \beta), \tag{6}$$

$$B_n(t_1,t_2,\alpha,\beta) = \| B_{n-K,n-\ell}(t_1,t_2,\alpha,\beta) \|;\ K,\ell = 0,1,\ldots,z. \tag{7}$$

Коррелированность компонент $H_n(t,\alpha,\beta)$ обусловлена корреляцией элементов поля $\xi(X,\alpha)$ и наличием общих областей обработки поля на близких интервалах интерполяции. Параметр z имеет смысл глубины памяти. Для анизотропных стационарных полей векторный случайный процесс периодически нестационарен. В случае нормальных процессов $\Psi(t)$ и $\varphi(t)$, когда матрица $B_n(t_1,t_2)$ полностью определяет многомерную плотность вероятности,

$$\lim_{\substack{T_n \to 0 \\ z \to \infty}} f(t,\alpha,\beta,T_n,z) = \Psi(t,\alpha,\beta). \tag{8}$$

Вместо интервала интерполяции T_n удобнее рассматривать смещение $\Delta R[n] = |R[n+1] - R[n]|$, которое для произвольного момента времени t_n зависит от фазы ν вектора смещения при анизотропии поля

$$\Delta R[n] = f(\nu). \tag{9}$$

Для дискретного задания фазы в интервале $(0, \pi/2)$ функция задается табличными значениями ΔR_1, ΔR_2, ..., ΔR_q. В случае изотропного поля $\Delta R[n]$ не зависит от ν.

С учетом вышеизложенного сформулируем задачу параметрической оптимизации аналитической модели идеального процесса $\Psi(t)$.

Д а н о:

I) нормальное случайное поле $\xi(X, \alpha)$ с известной автокорреляционной функцией $K_\xi(\rho)$;

2) обобщенная пространственно-частотная характеристика $H(\omega, \beta)$ пространственно-временного фильтра;

3) аналитическая модель (4), где вектор параметров

$$\gamma = |\tau, \Delta\tau_1, \Delta R_2, \ldots, \Delta R_q|^T; \tag{I0}$$

4) случайный векторный нормальный процесс $R(t,\sigma) = (y(t,\sigma), z(t,\sigma))^T$, определяемый матрицей корреляционных функций $K_R(t_1, t_2, \sigma)$ априори неизвестными параметрами σ;

5) случайный векторный нормальный процесс $H_n = (t, \alpha, \beta)$ с корреляционной матрицей $B_n(t_1, t_2, \alpha, \beta)$ при условии (6);

6) несимметричная ступенчатая интерполирующая функция $C(t)$.

Н а й т и:

I) для фиксированного значения глубины памяти τ оптимальные значения $\Delta R_1, \Delta R_2, \ldots, \Delta R_q$, доставляющие минимум функционалам (I) или (2);

2) допустимое значение глубины памяти τ, при котором значения функционалов ε_1 или ε_2 меньше допустимого.

В соответствии с идеей формирующего фильтра [2] представим аналитическую модель в виде линейной многомерной системы со случайными параметрами $\delta(n)$ с $\tau + 1$ входом и одним выходом как

$$\varphi_n(t) = \sum_{k=0}^{\tau} \int_0^\infty U_k(\tau, \alpha, \beta, \delta(n))\, v_{n-k}(t-\tau)\, d\tau \tag{II}$$

на интервале интерполяции $(t_n, t_n + T_n)$, где $U_k(\tau, \alpha, \beta, \delta(n))$ - весовая функция фильтра, $\delta(n)$ - параметры, например, постоянные времени.

Случайный процесс $U_{n-K}(t)$ представляет собой периодическую реализацию белого шума. Как следует из выражения (4), процесс на n интервале включает в себя отклики фильтров $U_K(\tau,\alpha,\beta,\delta(n))$, $K=1,2,..,\tau$ на периодические реализации белого шума, ранее уже использованные, тем самым формируется требуемая автокорреляционная функция $K_\varphi(t_1,t_2)$.

Для расчета весовых функций $U_K(\tau,\alpha,\beta,\delta(n))$ или передаточных функций $\Phi_K(j\omega,\alpha,\beta,\delta(n))$ фильтра необходимо использовать матрицу дискретных спектральных плотностей $G_n(\omega_s,\alpha,\beta,\delta(n))$,

$$G_n = \|g_{K\ell}(\omega_s,\alpha,\beta,\delta(n))\|;\ s=0,1,\ldots\infty;\ K,\ell=1,2,\ldots,\tau+1,$$

определяемую при усреднении по периоду Δt элементов корреляционной матрицы $B_n(t_1,t_2,\alpha,\beta)$ векторного случайного процесса $H_n(t,\alpha,\beta)$. Передаточные функции фильтров определяются из системы $\tau+1$ уравнений, составленных для n-го интервала интерполяции

$$g_{1m} = \sum_{s=0}^{\infty}\sum_{K=0}^{\tau-m}\Phi_K(-js\omega_0,n)\Phi_{K+m}(js\omega_0,n);\ m=0,1,\ldots,\tau. \qquad (12)$$

Для следующего $n+1$ интервала интерполяции вследствие изменения направления вектора $R[n+1]$ $G_n \neq G_{n+1}$ необходимо повторно решать систему (12). В общем случае для q - интервалов разбиения фазы ν число различных систем (12) равно q^{τ}. Автокорреляционная функция $K_\varphi(t_1,t_2)$ может быть получена известными методами анализа линейных систем со случайными параметрами.

В частном случае изотропного, стационарного поля $\xi(x,\alpha)$, отсутствия памяти $\tau = 0$ усредненная по интервалу интерполяции автокорреляционная функция определяется следующей формулой:

$$K_\varphi(\tau) = N_0/2\Big[\sum_{i=1-m}^{K-1}\frac{K-|i|}{K}\int_0^{\infty}U_0(\tau_1)U_0(\tau+\tau_1+i\Delta t)\,d\tau_1 +$$

$$+\sum_{i=m}^{K-1}\frac{K-i}{K}\int_{i\Delta t-\tau}^{\infty}U_0(\tau_1)U_0(\tau_1+\tau-i\Delta t)\,d\tau_1,$$

где $(m-1)\Delta t \le \tau < m\Delta t$, $T=K\Delta t$.

Физически процесс $\varphi(t)$ формируется путем смены с периодом T реализаций белого шума, периодически повторяющихся K раз с периодом Δt на интервале интерполяции T. Автокорреляционная функция $K_\varphi(\tau)$ соответствует траекториям $R(t)$ с одинаковыми приращениями за время T.

Для известного вектора параметров σ может быть решена задача параметрической оптимизации и получено минимальное значение функционала (2) при оптимальном T. В противном случае оптимизация проводится для наиболее вероятного вектора σ_B из области задания S_σ, и для вычисленного оптимального значения

11-5552

оценивается $\mathcal{E}_{max}$ функционала (2) по области S_σ. Если $\mathcal{E}_{max}$ больше допустимого значения, то расчет повторяется для модели с глубиной памяти $r=1$ и т.д. Учет памяти сужает класс траекторий $R(t)$, которые реализуются процессом $\varphi(t)$ с автокорреляционной функцией $K_\varphi(\tau)$ и, следовательно, уменьшается дисперсия $\mathcal{E}_2$. Аналогичные рассуждения допускаются и для вектора параметров модели γ. Общее выражение для $K_\varphi(t_1, t_2)$ при $r \geq 1$ более громоздко, чем (12), и здесь не приводится.

Таким образом, рассмотренное представление аналитической модели как многомерной линейной системы со случайными параметрами позволяет формировать выходной процесс в соответствии с текущими отсчетами траектории и получать оценку погрешности моделирования при априори неизвестных параметрах траектории из области их задания.

Литература

1. Левшин В.Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации.-М.:Машиностроение, 1978.-168с.

2. Пугачев В.С. Теория случайных функций.-М.:Физматгиз, 1962.-884с.

УДК 621.1

Н.Н.Васин, А.В.Логвинов, А.А.Хритин

МОДУЛЬ КАМАК ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ТЕРМОПАР

(г.Куйбышев)

При экспериментальных исследованиях сложных технических объектов производятся многочисленные измерения температурных параметров, достигающих порой нескольких сотен. При этом в качестве датчиков температуры обычно используются термопары (ТП), термоэдс "горячих" спаев(ГС)которых представляет собой постоянное напряжение милливольтового уровня. Особенностью структурной схемы измерительных преобразователей для термопар является наличие канала измерения температуры "холодного" спая (ХС). Термоэдс ГС