нескольких положительных эффектов – снижения числа ПЭВМ для обучения при сохранении дифференциальной скорости обучения и массовости обучения.

Практическое применение данного метода (обучения в парах сменного состава) показало повышение эффективности обучения от 1.5 до 3 раз!

Приведу пример возможного применения данного метода в рамках обучения на военном факультете студентов по программе офицеров запаса.

Группа из 20 человек делится на 10 пар (1-й со 2-м, 3-й с 4-м и т.д.). Материал подаваемый для усвоения делится на несколько частей. Для примера:

- основные ТТХ радиостанций;
- классификация радиостанций;
- ТТХ радиостанции Р-123;
- ТТХ радиостанции Р-130;
- и т.д.

Количество модулей может быть различно, в зависимости от количества подаваемого материала и времени занятия. Изучения материала происходит последовательно всеми обучающимися, но иногда (в зависимости от материала) возможна выдача в разные группы разных заданий.

После изучения материала предлагается пройти контроль знаний и для изучения следующего вопроса меняется состав групп.

К сожалению проверить эффективность предложенной методики в условиях факультета возможно только на практике.

Список используемой литературы

1. Михалев А.С. Дидактическая эвристика. Минск: РИВШ, 2013, 411с.
2. Михалев, А.С. Системный анализ обучения в парах сменного состава / А.С. Михалев // Инновационные образовательные технологии. – 2011. – №3(27). – С. 20-28.

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ, НАБЛЮДАЕМЫХ В СТОХАСТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СО СЛУЧАЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРОЙ

Косачев И.М., Кулешов Ю.Е.

При разработке вооружения и военной техники (ВВТ), а также других сложных технических систем гражданского назначения центральной задачей является синтез алгоритмов оптимального управления ими. В соответствии с теоремой разделения в теории стохастического оптимального управления для достижения поставленной цели требуется сначала решить задачу оптимальной нелинейной фильтрации случайных процессов, протекающих в этих системах, а затем на основании полученных оценок фильтруемых процессов осуществить синтез алгоритмов оптимального управления системой по заданному критерию оптимальности [1–7].

Математическое описание ВВТ и других сложных технических систем во многих случаях можно рассматривать в рамках непрерывных стохастических динамических систем со случайно изменяющейся структурой (ДССС).

Под стохастической динамической системой (СДС) со случайно изменяющейся структурой понимается такая СДС, которая имеет конечное число (равное S) фиксированных состояний структуры, переключаемых в случайные неперекрывающиеся моменты времени ΔT, а ее поведение (динамика) в каждом l-м $(l=\overline{1,S})$ фиксированных состояний структуры описывается системой стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) для вектора кусочно-непрерывных фазовых координат $Y^{(l)}(t)$ (для непрерывных СДС), либо системой стохастических разностных уравнений $X^{(l)}(t_k)$ (для дискретных СДС), либо системой стохастических дифференциально-разностных уравнений $\left\{(Y^{(l)}(t))^{\mathrm{T}},(X(t_k))^{\mathrm{T}}\right\}^{\mathrm{T}}$ (для непрерывно-дискретных СДС), (где «т» – операция транспонирования).

В дальнейшем из-за ограничений, накладываемых на объем статьи, будем рассматривать только непрерывные (кусочно-непрерывные) ДССС.

Изменения состояния структуры ДССС могут быть описаны на основе теории графов, теории случайных потоков, теории систем массового обслуживания, теории вероятностных автоматов, теории агрегатов и т. д. [8–15].

Исходя из условий универсальности, простоты и возможности реализации на практике аналитической методики исследования ДССС, в качестве оператора изменения состояния структуры ДССС наиболее целесообразно взять условную цепь Маркова, которая задается условными вероятностями перехода структуры ДССС из r-го состояния в l-е на малом интервале времени от t до $t + \Delta t$ выражением вида [7–16]

$$P\{L(t+\Delta t)=l\,/\,L(t)=r,Y(t)=y\}=\begin{cases}\nu^{(r,l)}(y,t)\Delta t+0(\Delta t) & \text{при } l\neq r;\\ 1-\sum\limits_{\substack{q=1\\ q\neq l}}^{S}\nu^{(l,q)}(y,t)\Delta t+0(\Delta t) & \text{при } l=r,\end{cases} \qquad (1)$$

где $P\{\cdot\}$ – вероятность события, стоящего в фигурных скобках;

$\nu^{(r,l)}(y,t)$ – интенсивность (средняя частота) перехода ДССС в момент времени t из состояния r в состояние l при условии, что значение случайного вектора фазовых координат Y равно y;

$0(\Delta t)$ – величина большего порядка малости по сравнению с Δt.

Применительно к ВВТ случайный характер изменения их структуры или (и) параметров обусловлен следующими тремя группами причин.

Первая группа – самой динамикой функционирования ВВТ в процессе боевой работы. Например, в процессе полета управляемой ракеты ее летно-баллистические характеристики скачкообразно изменяются при переходе с активного участка полета на пассивный (после окончания работы маршевого двигателя).

Для самолетов такими участками скачкообразного изменения структуры и параметров являются: участок взлета, когда самолетом управляет пилот; участок установившегося полета самолета с помощью автопилота на заданной высоте и участок посадки самолета.

Для космических летательных аппаратов и баллистических ракет дополнительно присутствуют участки выхода и входа в атмосферу Земли, отделения ускорителей и ступеней ракет и т. п.

Для зенитного ракетного комплекса (ЗРК) скачкообразное изменение структуры и параметров происходит в моменты захвата цели сначала на ручное, а затем на автоматическое сопровождение; в моменты смены методов наведения зенитной управляемой ракеты (ЗУР) в процессе ее наведения на цель и т. п.

Вторая группа – внешними случайными воздействиями со стороны окружающей среды или противника на процесс функционирования ВВТ, приводящими к изменению его структуры или (и) параметров. Например, воздействие атмосферы на летательный аппарат за счет появления резких порывов ветра, восходящих потоков воздуха, косой обдувки планера летательного аппарата, наличия ионизирующих областей и т. п. Или за счет применения воздушным противником различного рода помех, нарушающих функционирование ВВТ; совершение самолетом или ракетой противника резкого маневра; пуска противником по нашим РЛС, ЗРК или АСУ высокоточных средств поражения, что вынуждает их боевые расчеты применять различные меры защиты; внезапное применение самолетом противника радиолокационных или ИК-ловушек и т. п.

Третья группа причин обусловлена преднамеренным изменением структуры или (и) параметров ВВТ с целью адаптации (приспособления) процесса боевого функционирования ВВТ к негативному влиянию факторов первой и второй групп.

Вопросам калмановской фильтрации случайных процессов, протекающих в ДССС, посвящено не так уж много монографий и научных статей [5–9, 17–20].

Теория высокоточной фильтрации случайных процессов разработана в [21] только для стохастических динамических систем с фиксированной структурой (ДСФС).

Понятие «высокоточная фильтрация» введено в [21] для того, чтобы подчеркнуть высокую точность разработанных в рамках данной методологии алгоритмов по сравнению с алгоритмами классической калмановской фильтрации при фильтрации негауссовых случайных процессов или (и) в условиях больших интенсивностей шумов в канале наблюдения (измерителе). Проведенные в [21] исследования показали, что разработанные алгоритмы высокоточной фильтрации за счет учета высших апостериорных центральных моментов фильтруемого процесса обеспечивают в 8–15 раз более высокую точность фильтрации и помехоустойчивость оптимальных фильтров по сравнению с другими известными алгоритмами фильтрации, поэтому введение данного термина является правомочным.

Обзор значительного числа монографий и научных статей показал, что методология высокоточной фильтрации для ДССС до настоящего времени не разработана. Эта задача решена в данной статье.

Из-за ограничений, накладываемых на объем статей, публикуемых в Вестнике Военной академии Республики Беларусь, разрабатываемую теорию будем публиковать по частям. В данной первой части излагаются введение, постановка задачи и общее содержание методики высокоточной оптимальной нелинейной фильтрации случайных процессов, наблюдаемых в ДССС.

Во второй части статьи будут подробно рассмотрены девять этапов разрабатываемой методики высокоточной фильтрации случайных процессов, наблюдаемых в ДССС.

В третьей и последующих частях статьи будут рассмотрены примеры калмановской и высокоточной фильтрации случайных процессов, протекающих в системе самонаведения авиационной ракеты, при ее наведении на постановщики «малобазовых» (с консолей крыла одного самолета) и «большебазовых» (с двух самолетов) синхронных и несинхронных, медленных и быстрых мерцающих помех.

1. Постановка задачи высокоточной оптимальной нелинейной фильтрации случайных процессов, наблюдаемых в стохастических динамических системах со случайной структурой

Отличительными особенностями задачи оптимальной нелинейной фильтрации случайных процессов, наблюдаемых в ДССС являются следующие:

1) фильтрации (оптимальному оцениванию) подлежит не только случайный процесс $Y^{(l)}(t)$ в каждом l-м $(l=\overline{1,S})$ состоянии структуры ДССС, но и дискретный случайный процесс смены ее структуры $L(y,t)$;

2) при фильтрации линейного гауссового случайного процесса $Y^{(l)}(t)$ линейным каналом наблюдения с аддитивным шумом апостериорная плотность распределения вероятностей (АПРВ) наблюдаемого процесса на выходе канала наблюдения является негауссовой, а в ДСФС – гауссовой;

3) получение оптимальной оценки фильтруемого процесса $Y^{(l)}(t)$ отдельно для каждого l-го состояния структуры ДССС не гарантирует оптимальности оценки совокупного случайного процесса вида (2) с учетом всех S состояний структуры ДССС.

Эти особенности сильно усложняют процесс разработки методологии высокоточной оптимальной нелинейной фильтрации случайных многомерных процессов, протекающих в ДССС.

Теперь непосредственно перейдем к изложению особенностей постановки задачи высокоточной оптимальной нелинейной фильтрации случайных процессов в ДССС.

Под фильтрацией случайного процесса $\left[(Y^{(l)}(t))^{\mathrm{T}}, L(y,t)\right]^{\mathrm{T}}$ в ДССС понимается определение наиболее вероятных значений данных процессов в текущий момент времени t на основании их наблюдения $Z^{(l)}(t)$ до момента времени t с помощью канала наблюдения случайной структуры (КНСС) и априорной информации о данных процессах.

Схема, поясняющая задачу оптимальной фильтрации случайных процессов в ДССС, представлена на рисунке 1.

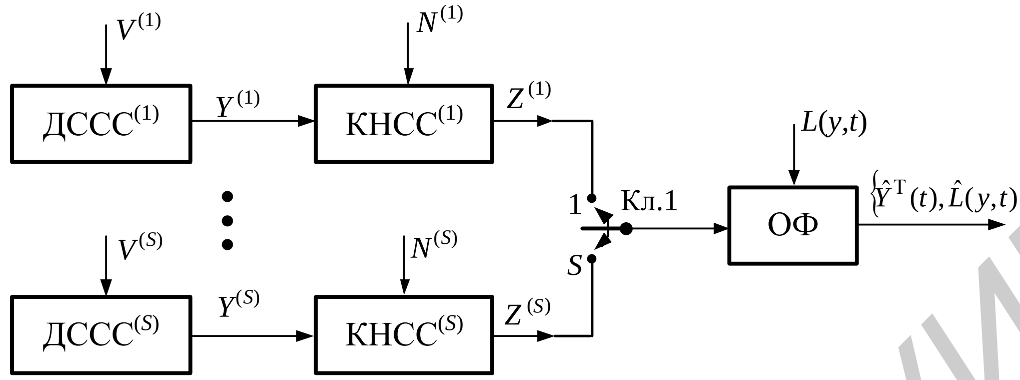

Рисунок 1. – Фильтрация случайных процессов в ДССС

Будем полагать, что имеется ДССС, вектор состояния которой в каждом l-м состоянии структуры описывается системой СДУ вида

$$\dot{y}_p^{(l)} = c_p^{(l)}(t) + \sum_{i=1}^{N_y} d_{pi}^{(l)}(t) y_i^{(l)}(t) + \sum_{j=1}^{N_\varphi} b_{pj}^{(l)}(t)\,\varphi_j^{(l)}(y^{(l)},t) + \sum_{m=1}^{N_v} h_{pm}^{(l)}(t) V_m^{(l)}(t), \quad y^{(l)}(t_0) = y_0^{(l)},$$

(2)

где $c_p^{(l)}(t)$ – детерминированная функция времени в СДУ для p-й ($p=\overline{1,N_Y}$) фазовой коор-динаты в l-м $(l=\overline{1,S})$ состоянии структуры ДССС;

$d_{pi}^{(l)}(t)$ – в общем случае нестационарный детерминированный коэффициент при i-й $i=\overline{1,N_Y}$ фазовой координате в СДУ для p-й фазовой координаты в l-м состоянии структуры;

$b_{pj}^{(l)}(t)$ – в общем случае нестационарный коэффициент при j-й $(j=\overline{1,N_\varphi})$ нелинейности в СДУ для p-й фазовой координаты в l-м состоянии структуры;

$\varphi_j^{(l)}(y^{(l)},t)$ – j-я нелинейность в СДУ для p-й фазовой координаты в l-м состоянии структуры;

$h_{pm}^{(l)}(t)$ – в общем случае нестационарный коэффициент при m-м $(m=\overline{1,N_v})$ белом шуме в СДУ для p-й фазовой координаты в l-м состоянии структуры;

$V_m^{(l)}(t)$ – m-й белый шум со спектральной плотностью $G_{vm}^{(l)}(t)$ и дельтаобразной корреляционой функцией в СДУ для p-й фазовой координаты в l-м состоянии.

На рисунке 1 выходные процессы ДССС в каждом l-м состоянии структуры наблюдаются (измеряются) с помощью «своего» многомерного безынерционного нелинейного канала наблюдения случайной структуры (КНСС), математическая модель которого задается уравнением вида

$$z_p^{(l)}(t) = \sum_{n=1}^{N_\psi} s_{pn}^{(l)}(t)\,\psi_n^{(l)}(y^{(l)},t) + \sum_{i=1}^{N_N} m_{pi}^{(l)}(t) N_i^{(l)}(t), \qquad (3)$$

где $z_p^{(l)}(t)$ – p-я $(p = \overline{1, N_z^{(l)}})$ компонента $N_z^{(l)}$-мерного случайного вектора измерений фильтруемого процесса $Y^{(l)}(t)$ в l-м состоянии КНСС;

$s_{pn}^{(l)}(t)$ – pn-я компонента $N_z^{(l)} \times N_\psi^{(l)}$-мерной матрицы детерминированных в общем случае нестационарных коэффициентов при $\psi_n^{(l)}(y^{(l)},t)$-й нелинейности в p-м уравнении в l-м состоянии КНСС;

$\psi_n^{(l)}(y,t)$ – n-я компонента $N_\psi^{(l)}$-мерной детерминированной векторной нелинейной функции в l-м состоянии КНСС;

$m_{pi}^{(l)}(t)$ – pi-я компонента $N_z^{(l)} \times N_N^{(l)}$-мерной матрицы в общем случае нестационарных коэффициентов при белых шумах в l-м состоянии КНСС;

$N_i^{(l)}(t)$ – i-я компонента $N_N^{(l)}$-мерного вектора белых гауссовых шумов в l-м состоянии КНСС со спектральной интенсивностью $Q_i^{(l)}(t)$ и дельтаобразной корреляционной функцией.

В дальнейшем будем полагать, что шумы $V_m^{(l)}(t)$ в стохастическом фильтруемом процессе вида (2) и $N_i^{(l)}(t)$ в КНСС вида (3) являются независимыми. Для упрощения записи в дальнейшем также не будем указывать, что размерности векторов и матриц $N_\psi^{(l)}$, $N_z^{(l)}$ и $N_N^{(l)}$ в каждом l-м состоянии КНСС могут быть различными.

Такая постановка задачи (ДССС + КНСС) обобщает случай фильтрации процессов в системах с разделением времени (рисунок 2), когда имеется ДССС с S состояниями структуры и всего один КН (ДССС+КН), на вход которого поочередно подаются выходные процессы в каждом из состояний ДССС, а также в системах с комплексированием измерителей, когда имеется одна стохастическая ДСФС и S каналов наблюдения (ДСФС+КНСС), которые подключены к выходу системы (рисунок 3).

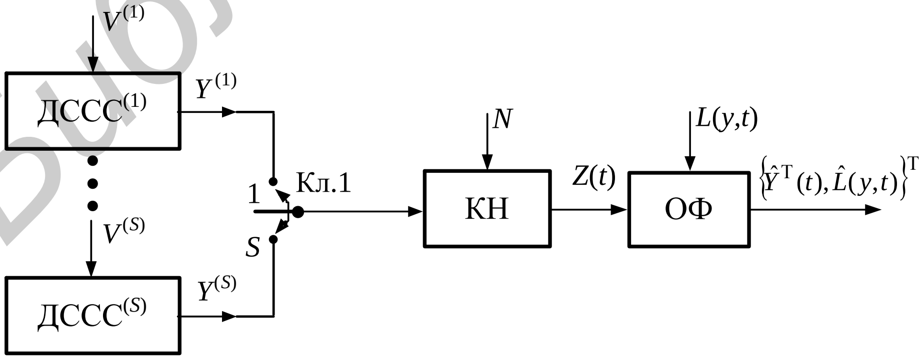

Рисунок 2. – Фильтрация процессов в системах с разделением времени

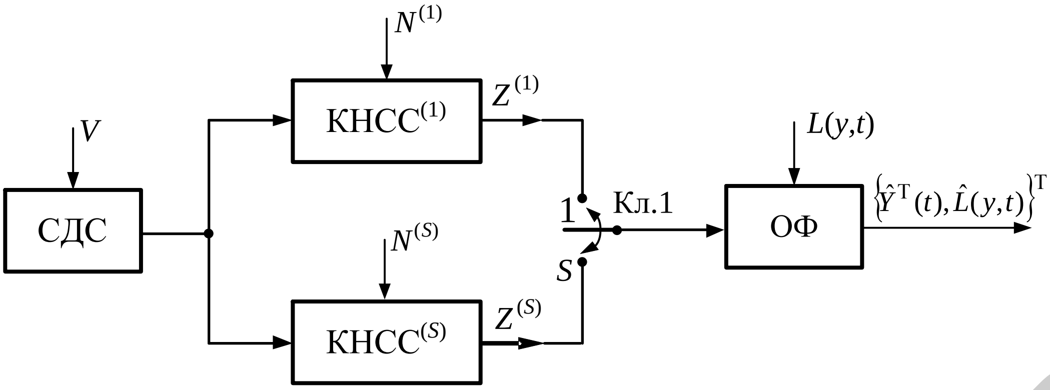

Рисунок 3. – Фильтрация процессов в системах с комплексированным измерителем

Выходы КНСС поочередно подключаются на вход оптимального фильтра (ОФ).

На выходе ОФ с использованием априорной информации о случайных процессах $Y(t)$ и $L(y,t)$ требуется получить (сформировать) оптимальную оценку состояния ДССС $\{\hat{Y}^{\mathrm{T}}(t), \hat{L}(y,t)\}^{\mathrm{T}}$.

Переходы в ДССС могут быть независимыми от значений фазовых координат, функционально зависимыми или зависимыми. Данное обстоятельство также существенно усложняет решение задачи оптимальной фильтрации случайных процессов в ДССС.

В теории оптимальной нелинейной фильтрации случайных процессов в ДССС В. М. Артемьевым получены уравнения типа Р. Л. Стратоновича для совместной (ненормированной) первой АПРВ совокупного процесса $\{Y^{\mathrm{T}}(t), \hat{L}(t)\}^{\mathrm{T}}$, определяемой так $\hat{\omega}_1(y,l,t) = P\{Y(t) = y, L(y,t) = l\}$ [8–10]. Аналогичные уравнения для условной (нормированной) АПРВ $\omega_1^{(l)}(y,t) = P\{Y(t) = y / L(y,t) = l\}$ получены И. Е. Казаковым [9, 10].

Отдавая дань уважения этим выдающимся советским военным ученым – основателям научной школы по теории ДССС – в дальнейшем уравнение для совместной (ненормированной) первой апостериорной ПРВ будем называть уравнением Стратоновича – Артемьева, а уравнение для условной (нормированной) – уравнением Стратоновича – Казакова.

Для совместной (ненормированной) апостериорной ПРВ уравнение Стратоновича – Артемьева имеет вид [8–10]

$$\frac{\partial \hat{\omega}_1(y,l,t)}{\partial t} = -\sum_{p=1}^{N_Y} \frac{\partial}{\partial y_p}\Big[A_p^{(l)}(y,t)\hat{\omega}_1(y,l,t)\Big] + \frac{1}{2}\sum_{p,k=1}^{N_Y} \frac{\partial^2}{\partial y_p \partial y_k}\Big[B_{pk}^{(l)}(y,t)\hat{\omega}_1(y,l,t)\Big] -$$

$$-\sum_{r=1}^{S} \nu^{(l,r)}(y,t)\hat{\omega}_1(y,l,t) + \sum_{r=1}^{S}\Big\langle \nu^{(r,l)}(y,t) q^{(r,l)}(Y,y,t)\Big\rangle^{(r)} - f^{(l)}(Y,z,t)\hat{\omega}_1(y,l,t) +$$

$$+\sum_{r=1}^{S}\Big\langle f^{(r)}(Y,z,t)\Big\rangle^{(r)}\hat{\omega}_1(y,r,t) , \qquad (4)$$

где $A_p^{(l)}(y,t)=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\left\langle \dfrac{\Delta Y_p^{(l)}(t)}{\Delta t}\,|\, y,t\right\rangle$ – p-я компонента вектора сноса $A^{(l)}(Y,t)$, характеризу-ющая среднее значение локальной скорости изменения p-й фазовой координаты фильтру-емого кусочно-непрерывного векторного марковского процесса $Y^{(l)}(t)$ в l-м состоянии структуры ДССС, рассчитываемая известным образом [4–10, 16,17], исходя их вида СДУ (2);

$B_{pk}^{(l)}(Y,t)=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\left\langle \dfrac{\Delta Y_p^{(l)}(t)\,\Delta Y_k^{(l)}(t)}{\Delta t}\,|\, y,t\right\rangle$ – pk-я компонента диффузионной матрицы $B^{(l)}(Y,t)$, характеризующая скорость изменения условного корреляционного момента p-й и k-й фазовых координат векторного процесса $Y^{(l)}(t)$ в l-м состоянии структуры ДССС, рассчитываемая известным образом, исходя их вида СДУ (2) [4–10, 16, 17];

$\Delta Y_p^{(l)}(t)=Y_p^{(l)}(t+\Delta t)-Y_p^{(l)}(t)$ – величина локального смещения фазовой координаты $Y_p^{(l)}$ в l-м состоянии структуры ДССС за отрезок времени Δt;

$f^{(l)}(Y,z,t)=\dfrac{1}{2}\sum\limits_{p,q=1}^{N_Z}\dfrac{R_{pq}^{(l)}}{\left|Q^{(l)}\right|}\left[z_p-\sum\limits_{i=1}^{N_\Psi}s_{pi}\psi_i(Y_i,t)\right]\left[z_q-\sum\limits_{j=1}^{N_\Psi}s_{qj}\psi_j(Y_j,t)\right]$ – производная от нату-рального логарифма функции правдоподобия в l-м состоянии КНСС, именуемая дальнейшем как обновляющий процесс;

$R_{pq}^{(l)}$ – алгебраическое дополнение элемента $Q_{pq}^{(l)}(t)$ в матрице интенсивностей шумов $Q^{(l)}(t)$ в l-м состоянии КНСС;

$\left|Q^{(l)}\right|=\det Q^{(l)}(t)$ – определитель матрицы $Q^{(l)}(t)$, рассчитываемый известным образом [4–10];

$\left\langle f^{(r)}(Y,z,t)\right\rangle^{(r)}=\int\limits_{R^{N_Y}} f^{(l)}(Y,z,t)\hat{\omega}_1(y,r,t)\,dy$ – усреднение от обновляющего процесса

по апостериорной ПРВ случайного многомерного процесса $Y(t)$ в r-м состоянии;

$q^{(r,l)}(Y,y,t)$ – условная ПРВ начальных значений вектора фазовых координат ДССС при переходе из r-го состояния в l-е.

Для условной (нормированной) АПРВ уравнение Стратоновича – Казакова выглядит так [9, 10]:

$$\frac{\partial \hat{\omega}_1^{(l)}(y,t)}{\partial t} = -\sum_{p=1}^{N} \frac{\partial}{\partial y_p}\left[A_p^{(l)}(y,t)\hat{\omega}_1^{(l)}(y,t)\right] + \frac{1}{2}\sum_{p,k=1}^{N} \frac{\partial^2}{\partial y_p \partial y_k}\left[B_{pk}^{(l)}(y,t)\hat{\omega}_1^{(l)}(y,t)\right] -$$

$$-\sum_{r=1}^{S}\left[\nu^{(l,r)}(y,t) - \left\langle \nu^{(l,r)}(y,t)\right\rangle^{(l)}\right]\hat{\omega}_1^{(l)}(y,t) + \sum_{r=1}^{S}\frac{\hat{P}^{(r)}(t)}{\hat{P}^{(l)}(t)}\left\langle \nu^{(r,l)}(y,t)\left[q^{(r,l)}(Y,y,t) - \hat{\omega}_1^{(l)}(y,t)\right]\right\rangle^{(r)} -$$

$$-\left[f^{(l)}(y,z,t) - \left\langle f^{(l)}(Y,z,t)\right\rangle^{(l)}\right]\hat{\omega}_1^{(l)}(y,t) - \sum_{r=1}^{S}\frac{(\hat{P}^{(r)}(t))^2}{\hat{P}^{(l)}(t)}\left\langle f^{(r)}(Y,z,t)\right\rangle^{(r)}(\hat{\omega}_1^{(l)}(y,t) - \hat{\omega}_1^{(r)}(y,t)). \quad (5)$$

Условная АПРВ $\hat{\omega}_1^{(l)}(y,t)$ введена И. Е. Казаковым в рассмотрение потому, что она нормирована к единице. Ее использование позволяет более просто получить уравнения для апостериорных вероятностных моментов требуемого порядка фильтруемого процесса случайной структуры.

Интегрируя уравнение Стратоновича – Артемьева вида (4) в бесконечных пределах с весом, равным единице, получим следующую формулу для расчета апостериорных вероятностей состояний структуры ДССС

$$\dot{\hat{P}}^{(l)}(t) = -\sum_{r=1}^{S}\hat{P}^{(l)}(t)\left\langle \nu^{(l,r)}(Y,t)\right\rangle^{(l)} + \sum_{r=1}^{S}\hat{P}^{(r)}(t)\left\langle \nu^{(r,l)}(Y,t)\right\rangle^{(r)} - \hat{P}^{(l)}(t)\left\langle f^{(l)}(Y,z,t)\right\rangle^{(l)} +$$

$$+\sum_{r=1}^{S}(\hat{P}^{(r)}(t))^2\left\langle f^{(r)}(Y,z,t)\right\rangle^{(r)}. \quad (6)$$

Интегро-дифференциальное уравнение (6) представляет собой алгоритм работы идентификатора состояний структуры ДССС. При его выводе учтено, что совместная (ненормированная) и условная (нормированная) АПРВ фильтруемого процесса случайной структуры связаны следующим соотношением:

$$\hat{\omega}_1(y,l,t) = \hat{P}^{(l)}(t)\hat{\omega}_1^{(l)}(y,t). \quad (7)$$

Для ДССС с автономными (независимыми) и полуавтономными (функционально зависимыми) переключениями состояния структуры уравнения (4) – (6) существенно упрощаются, так как в них интенсивности смены состояний $\nu^{(l,r)}$ и $\nu^{(r,l)}$ не зависят от значений вектора фазовых координат Y и поэтому их можно вынести за знаки усреднения $\langle\cdot\rangle^{(l)}$ и $\langle\cdot\rangle^{(r)}$.

Уравнения для совместной (ненормированной) и условной (нормированной) АПРВ вида (4) и (5) в отличие от аналогичных уравнений Фоккера – Планка – Колмогорова для не апостериорных ПРВ, используемых при статистическом анализе ДССС, являются нелинейными относительно этих искомых АПРВ из-за наличия в них квадратичных функционалов вида:

$$\left\langle f^{(l)}(Y,z,t)\right\rangle^{(l)}\hat{\omega}_1(y,l,t) = \int_{R^{N_Y}} f^{(l)}(Y,z,t)\hat{\omega}_1(y,l,t)dy \cdot \hat{\omega}_1(y,l,t); \quad (8)$$

$$\left\langle f^{(l)}(Y,z,t)\right\rangle^{(l)}\hat{\omega}_1^{(l)}(y,t) = \int_{R^{N_Y}} f^{(l)}(Y,z,t)\hat{\omega}_1^{(l)}(y,t)dy \cdot \hat{\omega}_1^{(l)}(y,t). \quad (9)$$

Поэтому эти АПРВ даже при фильтрации линейного кусочно-непрерывного марковского процесса линейным КНСС являются негауссовыми, что делает даже эту простейшую задачу оптимальной фильтрации нелинейной. Данное обстоятельство необходимо учитывать при разработке методологии фильтрации случайных процессов в ДССС.

Уравнения для АПРВ Стратоновича – Артемьева вида (4) и Стратоновича – Казакова вида (5) являются стохастическими интегро-дифференциальными нелинейными уравнениями в частных производных. Их аналитическое решение не возможно даже в одномерном случае (при фильтрации одномерного кусочно-непрерывного стохастического процесса со случайной структурой). Поэтому необходимо осуществить переход от условной (нормированной) АПРВ вида (5) к стохастическим интегро-дифференциальным уравнениям для апостериорных центральных моментов в общем случае произвольного R-го порядка фильтруемого процесса случайной структуры $Y(t)$, как это было сделано авторами при разработке методологии высокоточной нелинейной фильтрации случайных процессов, наблюдаемых в ДСФС [21]. При разработке методологии высокоточной нелинейной фильтрации случайных процессов, наблюдаемых в ДССС, за основу примем аналогичную методологию, разработанную авторами статьи для высокоточной фильтрации случайных процессов в стохастических ДСФС [21], которая подлежит существенной доработке.

2. Содержание методики высокоточной оптимальной нелинейной фильтрации случайных процессов, наблюдаемых в ДССС

Данная методика включает следующие девять основных этапов работ, каждый из которых, в свою очередь, также состоит из нескольких подэтапов.

1. Получение универсальных стохастических интегро-дифференциальных уравнений для апостериорных центральных моментов произвольного R-го (R = 1, 2, 3, 4, …) порядка фильтруемого многомерного процесса случайной структуры $Y^{(l)}(t)$, описываемого системой СДУ вида (2).

2. На основании общего универсального стохастического интегро-дифференциального уравнения для апостериорных центральных моментов произвольного R-го порядка записываются уравнения для апостериорных центральных моментов первых шести (как правило, на практике больше не требуется) порядков ($R \le 6$) для многомерного фильтруемого процесса $Y^{(l)}(t)$ в l-м состоянии структуры ДССС.

3. Получение развернутой системы стохастических интегро-дифференциальных уравнений для апостериорных центральных моментов требуемого порядка исходя из конкретного вида математических моделей фильтруемого процесса $Y^{(l)}(t)$, например вида (2), и канала наблюдения $Z^{(l)}(t)$, например вида (3).

4. Сведение развернутой системы стохастических интегро-дифференциальных уравнений для апостериорных центральных моментов требуемого порядка к соответствующей ей системе стохастических дифференциальных уравнений путем раскрытия всех усреднений в интегро-

дифференциальных уравнениях с использованием нового метода статистической аппроксимации нелинейностей произвольного вида [21, 22].

5. Получение усеченной (ограниченной) и замкнутой системы стохастических дифференциальных уравнений для учитываемых итерационным образом апостериорных центральных моментов фильтруемого процесса случайной структуры $Y^{(l)}(t)$.

6. Расчет безусловных (с учетом наличия S состояний структуры ДССС) апостериорных центральных моментов фильтруемого многомерного кусочно-непрерывного случайного процесса по значениям его условных апостериорных центральных моментов в каждом l-м $(l=\overline{1,S})$ состоянии.

7. Выбор критерия оптимальности фильтрации многомерного стохастического процесса случайной структуры $\left\{Y^{\mathrm{T}}(t), L(y,t)\right\}^{\mathrm{T}}$ при наблюдаемых и ненаблюдаемых моментах смены структуры и составление алгоритмов работы (синтез) высокоточного оптимального фильтра.

8. Определение недостающих начальных условий для интегрирования замкнутой системы стохастических дифференциальных уравнений для учитываемых итерационным образом апостериорных центральных моментов фильтруемого процесса случайной структуры $Y^{(l)}(t)$.

9. Численное интегрирование на ЭВМ системы стохастических дифференциальных уравнений для учитываемых апостериорных центральных моментов, уточнение алгоритмов фильтрации и получение оптимальных оценок фильтруемого процесса случайной структуры в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. Современная и прикладная теория управления. Оптимизационный подход к теории управления: в 3 т. / под ред. А. А. Колесникова. – Таганрог: ТРТУ, 2000.

2. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского – М.: Наука, 1987.

3. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб.: в 5 т. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.

4. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М.: Наука, 1987.

5. Пугачев, В. С. Теория стохастических систем / В. С. Пугачев, И. Н. Синицын. – М.: Логос, 2004.

6. Пугачев, В. С. Стохастические дифференциальные системы: Анализ и фильтрация / В. С. Пугачев, И. Н. Синицын. – М.: Наука, 1990. – 632 с.

7. Нелинейные системы управления: описание, анализ и синтез / А. В. Пантелеев [и др.]. – М.: Вуз. кн., 2008. – 312 с.

8. Артемьев, В. М. Теория систем со случайными изменениями структуры / В. М. Артемьев. – Минск: Вышэйш. шк., 1979. – 186 с.

9. Казаков, И. Е. Оптимизация динамических систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев. – М.: Наука, 1980. – 368 с.

10. Казаков, И. Е. Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалев. – М.: Физматлит, 1993. – 272 с.
11. Харари, Ф. Теория графов / Пер. с англ. под ред. Г. П. Гаврилова. Изд. 2-е. – М.: Едитариал УРСС, 2003. – 296 с.
12. Большаков, И. А. Прикладная теория случайных потоков / И. А. Большаков, В. С. Ракошиц. – М.: Сов. радио, 1978.
13. Артемьев, В. М. Дискретные системы управления со случайным периодом квантования / В. М. Артемьев, А. В. Ивановский. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
14. Климов, Г. П. Теории массового обслуживания / Г. П. Климов. – М.: Моск. ун-т, 2011. – 312 с.
15. Бухараев, Р. Г. Основы теории вероятностных автоматов / Р. Г. Бухараев. – М.: Наука, 1985. –288 с.
16. Колмогоров А. Н, Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1981.
17. Синицын, И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева: учеб. пособие / И. Н. Синицын. – М.: Унив. кн., Логос, 2006. – 640 с.
18. Жук, С. Я. Методы оптимизации дискретных систем со случайной структурой: моногр. / С. Я. Жук. – Киев: КПИ, 2008. – 232 с.
19. Федосов, Е. А. Системы управления конечным положением в условиях противодействия среды / Е. А. Федосов, В. В. Инсаров, О. С. Селивохин. – М.: Наука, 1989. – 272 с.
20. Бухалев, В. А. Оптимальное сглаживание в системах со случайной скачкообразной структурой / В. А. Бухалев. – М.: Физматлит, 2013. – 188 с.
21. Борисов, А. В. Оптимальная фильтрация состояний специальных управляемых систем случайной структуры / А. В. Борисов, А. И. Стефанович // Теория и системы управления. – 2007. – № 3. – С. 16–26.
22. Косачев, И. М. Методология высокоточной нелинейной фильтрации случайных процессов в стохастических динамических системах с фиксированной структурой / И. М. Косачев, Ю. Е. Кулешов // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 4 (45). – С. 125–161.
23. Косачев, И. М. Аналитическое моделирование стохастических систем / И. М. Косачев, М. Г. Ерошенков. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 264 с.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Круглов С.Н.

Под средствами новых информационных технологий будем понимать программно-аппаратные средства и устройства, функционирующие на базе микропроцессорной, вычислительной техники, а также современных средств и систем информационного обмена, обеспечивающие операции по сбору, продуцированию, накоплению, хранению, обработке, передаче информации.