

АДАПТИВНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А. В. Иванов, С. П. Москвитин, В. О. Сурков

*Кафедра «Радиотехника»; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
aleksandr-ivanov68@yandex.ru.*

Ключевые слова: адаптивное оценивание; дискретно-непрерывный процесс; идентификация; марковская теория оценивания случайных процессов.

Аннотация: Методами марковской теории оценивания случайных процессов решена задача получения комплексных оптимальных алгоритмов адаптивного оценивания и идентификации сигналов спутниковых радионавигационных систем, которая сводится к задаче идентификации и адаптивного оценивания дискретно-непрерывных процессов. Дискретный процесс представляет собой двухкомпонентный составной процесс, каждая компонента которого является векторным процессом. Непрерывный процесс представляет собой многокомпонентный диффузионный процесс. Задача идентификации рассматривается как задача параметрического оценивания.

Введение

В настоящее время для решения задач навигации наземных подвижных объектов (НПО) используются навигационные системы (НС), обеспечивающие определение координат с точностью до 100 м [1 – 4]. Основу таких НС составляют инерциальная навигационная система (ИНС) и аппаратура потребителя (АП) радиосигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС). В современных НС для определения текущих координат и параметров движения используются комплексные алгоритмы, разработанные методами оптимальной линейной фильтрации [5 – 9]. Необходимость решения НПО специальных задач, таких как поисково-спасательные работы, задачи Минобороны России, МВД России, ФСБ России требует создание НС, которые осуществляли бы определение координат с точностью 5...15 м, а также обеспечивали бы контроль целостности навигационной информации СРНС [5, 10, 11]. Под последним понимается возможность определять отказ навигационного космического аппарата (НКА) и передачу неверных навигационных данных НКА СРНС. Имеющиеся на сегодняшний день системы обеспечения потребителей сигналами тревоги об отказе НКА и недостоверности навигационных сигналов НКА СРНС не обеспечивают необходимое для выявления факта нарушения целостности время порядка 15...30 с при решении поисково-спасательных задач [5].

Существенный положительный эффект при разработке НС, обеспечивающих решение вышеуказанных задач, достигается на основе применения методов марковской теории оценивания случайных процессов, путем синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки информации [12]. Применение данных методов синтеза позволяет: *во-первых*, обеспечить высокий уровень интеграции обо-

рудования в НС и повышение качества обработки сигналов (точность и помехоустойчивость); *во-вторых*, выявить факт отказа НКА и исключить из обработки информацию от него путем реконфигурации структуры АП; *в-третьих*, выявить факт неправильной передачи навигационных данных на основе создания алгоритмов адаптивного оценивания и идентификации.

Цель работы – методами марковской теории оценивания случайных процессов получить для НС оптимальные алгоритмы совместного обнаружения, адаптивного оценивания и идентификации, позволяющие помимо оценки состояния радионавигационного поля сигналов СРНС и поля символов служебной информации (ССИ) решать задачу адаптивного оценивания и идентификации навигационных данных.

Постановка задачи

Считаем, что на НПО установлена НС, включающая в свой состав ИНС, барометрический высотомер (БВ) и M -канальную аппаратуру приема сигналов СРНС. Полагаем, что сигналы на выходе ИНС по скорости, а также измеренное значение вертикального ускорения преобразованы в геоцентрическую систему координат (СК), оси которой совпадают с северным, восточным направлениями и местной вертикалью. Выходные сигналы ИНС представим, аналогично [10, 11], в виде:

$$\begin{aligned} Z_N^{\text{ИНС}}(t) &= V_N(t) + \varepsilon_N(t); \\ Z_E^{\text{ИНС}}(t) &= V_E(t) + \varepsilon_E(t); \\ Z_\zeta^{\text{ИНС}}(t) &= a_\zeta(t) + \Delta_{a_\zeta}(t) + g + \varepsilon_{a_\zeta}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $Z_N^{\text{ИНС}}(t)$, $Z_E^{\text{ИНС}}(t)$ и $Z_\zeta^{\text{ИНС}}(t)$ – измеренные значения горизонтальных составляющих вектора земной скорости и абсолютного ускорения; g – ускорение свободного падения; $a_\zeta(t)$ – истинное значение абсолютного ускорения; $\varepsilon_N(t)$, $\varepsilon_E(t)$, $\varepsilon_{a_\zeta}(t)$ – флуктуационные погрешности измерения скорости:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_N(t)}{dt} &= \Delta_{a_N}(t) + \varepsilon_{a_N}(t), \quad \varepsilon_{a_N}(t_0) = \varepsilon_{a_N0}; \quad \frac{d\varepsilon_E(t)}{dt} = \Delta_{a_E}(t) + \varepsilon_{a_E}(t), \quad \varepsilon_{a_E}(t_0) = \varepsilon_{a_E0}; \\ \frac{d\Delta_{a_N}(t)}{dt} &= 0, \quad \Delta_{a_N}(t_0) = \Delta_{a_N0}; \quad \frac{d\Delta_{a_E}(t)}{dt} = 0, \quad \Delta_{a_E}(t_0) = \Delta_{a_E0}; \\ \frac{d\Delta_{a_\zeta}(t)}{dt} &= 0, \quad \Delta_{a_\zeta}(t_0) = \Delta_{a_\zeta0}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{d\varepsilon_{a_E}(t)}{dt} = -a_a \varepsilon_{a_E}(t) + \sqrt{2a_a \sigma_a^2} n_{a_E}(t), \quad \frac{d\varepsilon_{a_\zeta}(t)}{dt} = -a_a \varepsilon_{a_\zeta}(t) + \sqrt{2a_a \sigma_a^2} n_{a_\zeta}(t);$$

$$\frac{d\varepsilon_{a_\zeta}(t)}{dt} = -a_a \varepsilon_{a_\zeta}(t) + \sqrt{2a_a \sigma_a^2} n_{a_\zeta}(t),$$

где n_{a_N} , n_{a_E} , n_{a_ζ} – формирующие стандартные белые гауссовские шумы; a_a – коэффициент, характеризующий ширину спектра флуктуационных ошибок;

σ_a^2 – дисперсия флуктуационных ошибок. При этом постоянные (медленно меняющиеся) ошибки измерения ускорений Δ_{aN} , Δ_{aE} , $\Delta_{a\zeta}$ имеют нулевое среднее значение и дисперсии $\sigma_{\Delta a}^2$.

Считаем, что измерение высоты объекта при помощи БВ осуществляется относительно уровня, соответствующего известному R_0 радиус-вектору геоцентрической (сферической) СК, а систематическая ошибка учитывается при его выставке. Сигнал на выходе БВ $Z_{\text{БВ}}(t)$ в дискретные моменты времени представим в виде

$$Z_{\text{БВ}}(t_{k+1}) = [R(t_{k+1}) - R_0] + \Delta H(t_{k+1}) + u_{\text{БВ}}(t_{k+1}), \quad (3)$$

где $\Delta H(t_{k+1})$ и $u_{\text{БВ}}(t_{k+1})$ – постоянная и флуктуационная погрешности измерения БВ, описываемые выражениями [12]:

$$\Delta H(t_{k+1}) = \Delta H(t_k); \quad \Delta H(t_0) = \Delta H_0;$$

$$u_{\text{БВ}}(t_{k+1}) = \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k)u_{\text{БВ}}(t_k) + \gamma_u(t_{k+1}, t_k)n_u(t_k), \quad u_{\text{БВ}}(t_0) = u_{\text{БВ}0}, \quad (4)$$

где $\varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) = \exp(-\gamma_{\text{БВ}}T)$; $\gamma_u(t_{k+1}, t_k) = \sigma_{\text{БВ}} \left[1 - \varphi_{uu}^2(t_{k+1}, t_k) \right]^{0,5}$; $\gamma_{\text{БВ}}$ и $\sigma_{\text{БВ}}^2$ – коэффициенты, характеризующие ширину спектра погрешности и дисперсии флуктуационной погрешности соответственно; $n_u(t_k)$ – независимые выборки гауссовского процесса с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Полагаем, что в НС входит M -канальный приемник, обеспечивающий прием радиосигналов СРНС типов NAVSTAR и ГЛОНАСС. Сигнал на входе i -го, $i = \overline{1, M}$, приемного канала на тактовом полуинтервале $[t_k, t_{k+1})$ длительностью T представим в виде [10]

$$\xi_i(t) = \lambda_{ik}(t)S_i[t, D_i, \psi_i, \theta_{ik}] + n_i(t), \quad t \in [t_k, t_k + T), \quad (5)$$

где $S_i[t, D_i, \psi_i, \theta_{ik}] = A_i g_i \left(t - t_k - \frac{D_i(t)}{c} \right) \cos[2\pi f_0 t + \psi_i(t) + \theta_{ik} \pi]$ – полезный радиосигнал; λ_{ik} , θ_{ik} – дискретные параметры, принимающие одно из альтернативных значений $\lambda_{ik}(t) = 1$ и $\lambda_{ik}(t) = 0$, $\theta_{ik}(t) = 1$ и $\theta_{ik}(t) = 0$; $g_i(\cdot)$ – модулирующая псевдослучайная последовательность (ПСП) с известным законом формирования; $D_i(t)$ – квазидальность от НПО до i -го НКА; $\psi_i(t)$ – случайная фаза сигнала; c – скорость распространения радиоволн; $n_i(t)$ – взаимонезависимый гауссовский шум наблюдения с известными статистическими характеристиками: $M[n_i(t)] = 0$; $M[n_i(t)n_i(t + \tau)] = (N_{0i}/2)\delta(\tau)$; $M[\cdot]$ – операция усреднения по множеству реализаций; $\delta(\tau)$ – дельта-функция.

Введем дискретные векторные процессы $\Lambda = [\lambda_i(t)]$ и $\Theta(t) = [\theta_i(t)]$, $i = \overline{1, M}$. Считаем, что их состояния упорядочены на основе прямого произведения состояний параметров λ_ℓ и θ_ℓ , и они в любой момент времени принимают только одно значение из соответствующих конечных множеств. Для произвольного момента

времени $t > t_0$ безусловные вероятности $P_\lambda(t) = [p_{\lambda_i}(t) = P\{\Lambda(t) = \Lambda_i\}]$ и $P_\theta(t) = [p_{\theta_i}(t) = P\{\Theta(t) = \Theta_i\}]$, $i = \overline{1, m}$, $m = 2^M$ могут быть определены на основе векторного произведения:

$$P_i(t) = P_{i_1}(t) \otimes P_{i_2}(t) \otimes \dots \otimes P_{i_\ell}(t) \otimes \dots \otimes P_{i_M}(t) = \bigotimes_{\ell=1}^M P_{i_\ell}(t), \quad i = \lambda, \theta, \quad (6)$$

где $P_{\lambda_\ell}(t) = [P\{\lambda_\ell(t)=1\}, P\{\lambda_\ell(t)=0\}]^T$; $P_{\theta_\ell}(t) = [P\{\theta_\ell(t)=1\}, P\{\theta_\ell(t)=0\}]^T$.

В качестве математических моделей смены состояний введенных полей используем модели в виде дискретных марковских процессов. Полагаем, что на интервалах времени (t_k, t_{k+1}) дискретные процессы постоянны:

$$\frac{d\lambda_{ik}(t)}{dt} = 0; \quad \lambda_{ik}(t_k + 0) = \lambda_{ik0}; \quad \frac{d\theta_{ik}(t)}{dt} = 0; \quad \theta_{ik}(t_k + 0) = \theta_{ik0};$$

$$\mathbf{P}_{\lambda_{ik}}(t_{k+1} - 0) = \mathbf{P}_{\lambda_{ik}}(t_k + 0); \quad \mathbf{P}_{\theta_{ik}}(t_{k+1} - 0) = \mathbf{P}_{\theta_{ik}}(t_k + 0), \quad i = \overline{1, M} \quad (7)$$

и могут скачком изменять свои значения в моменты времени $t_{k+1} = t_k + T$. На соседних тактовых интервалах значения векторных дискретных процессов независимы и их нахождение в начале каждого тактового интервала в каждом состоянии равновероятно

$$\mathbf{P}_\lambda[t_k + 0] = \mathbf{P}_\theta[t_k + 0] = \frac{1}{m} \mathbf{E}, \quad (8)$$

где \mathbf{E} – единичный вектор, размером $m \times 1$.

Сформируем из векторных дискретных процессов $\Lambda(t) = [\lambda_i(t)]$, $\lambda_i(t) = [\lambda_i(t)=1 \quad \lambda_i(t)=0]^T$, $i = \overline{1, M}$, и $\Theta(t) = [\theta_i(t)]$, $\theta_i(t) = [\theta_i(t)=1 \quad \theta_i(t)=0]^T$, $i = \overline{1, M}$, двухкомпонентный векторный дискретный процесс $\Omega(t) = [\Omega_i(t)]$, $i = \overline{1, M}$, состояния которого на полуинтервалах времени $[t_k, t_{k+1})$ определяются на основе прямого векторного произведения векторов состояний дискретных параметров λ_{ik} и θ_{ik} .

Вектору Ω_{ik} соответствует вектор безусловных вероятностей

$$\mathbf{P}_{\Omega_{ik}} = [P_{\Omega_{ik1}}\{\Omega_{ik} = \Omega_{ik1}\} \quad P_{\Omega_{ik2}}\{\Omega_{ik} = \Omega_{ik2}\} \quad P_{\Omega_{ik3}}\{\Omega_{ik} = \Omega_{ik3}\} \quad P_{\Omega_{ik4}}\{\Omega_{ik} = \Omega_{ik4}\}]^T,$$

который может быть определен путем прямого векторного произведения векторов безусловных вероятностей состояний дискретных параметров $\mathbf{P}_{\Omega_{ik}} = [\mathbf{P}_{\lambda_{ik}} \otimes \mathbf{P}_{\theta_{ik}}]$.

На полуинтервалах времени $[t_k, t_{k+1})$ векторный дискретный процесс Ω_k может находиться в одном из $r = 2^{2M}$ состояний, которым будет соответствовать вектор безусловных вероятностей двухкомпонентного векторного дискретного процесса, определяемый как

$$\mathbf{P}_{\Omega_k} = \bigotimes_{i=1}^M \mathbf{P}_{\Omega_{ik}}.$$

Полагаем, что флуктуации фаз радиосигналов $\psi_i(t)$ описываются уравнениями [10]:

$$\frac{d\psi_i(t)}{dt} = \Delta\omega_i(t) - \frac{2\pi f_0}{c} \frac{dD_i(t)}{dt} + (N_\psi/2)^{0,5} n_{\psi i}(t), \quad \psi_i(t_0) = \psi_{i0};$$

$$\frac{d\Delta\omega_i(t)}{dt} = -\gamma_\omega \Delta\omega_i(t) + (2\gamma_\omega \sigma_\omega^2)^{0,5} n_{\omega i}(t), \quad \Delta\omega_i(t_0) = \Delta\omega_{i0}, \quad (9)$$

где $\Delta\omega_i(t)$ – уход частоты за счет долговременной нестабильности задающих генераторов (ЗГ); γ_ω – коэффициент, характеризующий ширину спектра флуктуации частоты ЗГ; σ_ω^2 – дисперсия флуктуаций частоты ЗГ; N_ψ – характеризует естественные (кратковременные) нестабильности ЗГ, а также учитывает влияние на фазу радиосигнала условий распространения радиоволн в ионосфере; $n_{\psi i}$, $n_{\omega i}$ – взаимнонезависимые формирующие стандартные белые гауссовские шумы.

Положение подвижного наземного объекта зададим в геоцентрической СК, широтой $\varphi(t)$ и долготой $\lambda(t)$, а также радиус-вектором $R(t)$

$$R(t) = R_0 + h_p(t), \quad (10)$$

где $h_p(t)$ – случайное отклонение рельефа поверхности Земли относительно R_0 .

Динамика изменения во времени геоцентрических широты $\varphi(t)$ и долготы $\lambda(t)$ описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = b_1(t)V_N(t), \quad \varphi(t_0) = \varphi_0; \quad \frac{d\lambda(t)}{dt} = b_2(t)V_E(t), \quad \lambda(t_0) = \lambda_0, \quad (11)$$

где $b_1(t) = 1/R(t)$; $b_2(t) = [R(t)\cos(\varphi(t))]^{-1}$.

Значение квазидальности $D_i(t)$ между НПО и i -м НКА, выраженное через известные в гринвичской СК координаты x_i, y_i, z_i НКА и геоцентрические координаты $\varphi(t), \lambda(t), R(t)$ НПО описывается, аналогично [15], выражением

$$D_i(t) = \left\{ [R(t)\cos\varphi(t)\cos\lambda(t) - x_i(t-\tau)]^2 + [R(t)\cos\varphi(t)\sin\lambda(t) - y_i(t-\tau)]^2 + [R(t)\sin\varphi(t) - z_i(t-\tau)]^2 \right\}^{0,5} + \delta d(t), \quad (12)$$

где τ – запаздывание радиосигнала относительно момента излучения НКА, соответствующее значению дальности до НКА; $\delta d(t)$ – сдвиг по дальности, обусловленный отклонением бортовой шкалы времени НПО относительно единой шкалы времени НКА, который для интервала времени T можно полагать постоянным:

$$\frac{d}{dt} \delta d(t) = 0; \quad \delta d(t_0) = \delta d_0. \quad (13)$$

В работе [11] показано, что скорость изменения во времени квазидальности, описываемой выражением (12), определяется равенством

$$\frac{dD_i(t)}{dt} = b_{3i}(t)V_N(t) + b_{4i}(t)V_E(t) + b_{5i}(t)V_p(t) - \\ - b_{6i}(t)V_{xi}(t - \tau) - b_{7i}(t)V_{yi}(t - \tau) - b_{8i}(t)V_{zi}(t - \tau), \quad (14)$$

где $V_{xi}(t), V_{yi}(t), V_{zi}(t)$ – составляющие вектора земной скорости i -го НКА в гринвичской прямоугольной СК; $V_p(t)$ – скорость изменения рельефа местности, соответствующая вертикальной скорости НПО, который движется по этой поверхности; $b_{qi}(t), q = \overline{3, 8}$ – коэффициенты, определяемые известными выражениями [13].

Изменение во времени радиус-вектора $R(t)$ НПО можно записать в виде:

$$\frac{dR(t)}{dt} = V_p(t), \quad R(t_0) = R_H; \quad \frac{dV_p(t)}{dt} = a_\zeta(t), \quad V_p(t_0) = V_{p0}, \quad (15)$$

где $a_\zeta(t)$ – вертикальная составляющая вектора абсолютного ускорения НПО.

Для задания математической модели изменения вертикальной составляющей вектора абсолютного ускорения НПО в выражении (15) применим подход распределения информации [12]. В соответствии с этим подходом заменим значение абсолютного вертикального ускорения на измеренное ИНС, то есть используем в качестве компоненты вектора управления выходной сигнал ИНС. Полагаем также, что на тактовом интервале $t \in [t_k, t_k + T)$ значение ускорения остается постоянной величиной. Тогда уравнения (15) примут вид:

$$\frac{dR(t)}{dt} = V_p(t), \quad R(t_0) = R_H; \quad \frac{dV_p(t)}{dt} = Z_\zeta^{\text{ИНС}}(t) - \Delta_{a_\zeta}(t) - g - \varepsilon_{a_\zeta}(t), \quad V_p(t_0) = V_{p0}. \quad (16)$$

Представление квазидальности в полезном сигнале СРНС выражением (12) с последующей записью изменения радиус-вектора $R(t)$ в виде выражений (16) позволяет оценить постоянную (медленно меняющуюся) составляющую $\Delta_{a_\zeta}(t)$ погрешности измерения с помощью информации СРНС. Значение постоянной составляющей $\Delta_{a_\zeta}(t)$ для конкретного типа ИНС за время работы при решении задач навигации не превышает некоторого заранее известного предельного значения [13]. Если в результате сбоя или какого-либо иного внешнего воздействия произойдет искажение передаваемой информации одним из i -х, $i = \overline{1, 4}$ НКА, используемого рабочего созвездия спутников, то это приведет к изменению постоянной составляющей $\Delta_{a_\zeta}(t)$. В соответствии с этим для определения такого события необходимо идентифицировать значение $\Delta_{a_\zeta}(t)$, которое в данном случае будет характеризовать достоверность передаваемой информации выбранным рабочим созвездием. С этой целью введем параметр $\mu(t) = \Delta_{a_\zeta}(t)$, тогда уравнения (16) запишутся в виде:

$$\frac{dR(t)}{dt} = V_p(t), \quad R(t_0) = R_H; \quad \frac{dV_p(t)}{dt} = Z_\zeta^{\text{ИНС}}(t) - \mu(t) - g - \varepsilon_{a_\zeta}(t), \quad V_p(t_0) = V_{p0}. \quad (17)$$

Система дифференциальных уравнений (17) зависит от неизвестного параметра $\mu(t)$, изменение которого в дискретные моменты времени, согласно (2), имеет вид

$$\mu(t_{k+1}) = \mu(t_k). \quad (18)$$

Вектор состояния $\mathbf{X}(t)$ сформируем в геоцентрической СК при условии, что в рабочее созвездие входит четыре НКА. Для сокращения его размерности применим подход распределения информации [12], выразив истинные значения V_N, V_E в выражении (11) через измеренные, описываемые выражением (1), отнеся выходные сигналы ИНС $Z_N^{\text{ИНС}}(t_k), Z_E^{\text{ИНС}}(t_k)$ к вектору управления. Тогда вектор состояния имеет вид: $\mathbf{X}(t) = [\varphi(t), \lambda(t), R(t), \Delta H(t), V_p(t), \psi_1(t), \psi_2(t), \psi_3(t), \psi_4(t), \Delta\omega_1(t), \Delta\omega_2(t), \Delta\omega_3(t), \Delta\omega_4(t), \delta d(t), \varepsilon_N(t), \varepsilon_E(t), \Delta_{aN}(t), \Delta_{aE}(t)]^T$, а изменение его во времени, в соответствии с (2), (4), (9), (11), (13), (14), (17), может быть описано векторно-матричным дифференциальным стохастическим уравнением

$$\frac{d\mathbf{X}_\mu(t)}{dt} = \mathbf{F}_x \mathbf{X}_\mu(t) + \mathbf{C}[\mu(t)] \mathbf{W}(t) + \mathbf{G}_x \mathbf{N}_x(t), \quad \mathbf{X}_\mu(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (19)$$

где $\mathbf{W} = [Z_N^{\text{ИНС}}, Z_E^{\text{ИНС}}, Z_\zeta^{\text{ИНС}}, V_{x1}, V_{y1}, V_{z1}, V_{x2}, V_{y2}, V_{z2}, V_{x3}, V_{y3}, V_{z3}, V_{x4}, V_{y4}, V_{z4}, g]^T$ – известный вектор управления; $\mathbf{N}_x = [n_p, n_{\psi 1}, n_{\psi 2}, n_{\psi 3}, n_{\psi 4}, n_{\omega 1}, n_{\omega 2}, n_{\omega 3}, n_{\omega 4}, n_{\psi PB}, n_{aN}, n_{aE}, n_{a\zeta}]^T$ – вектор взаимонезависимых стандартных белых гауссовских шумов; $\mathbf{F}_x, \mathbf{C}, \mathbf{G}_x$ – известные матрицы, где матрица \mathbf{C} зависит от параметра $\mu(t)$, характеризующего достоверность информации СРНС. Уравнению (19) соответствует векторно-матричное разностное стохастическое уравнение

$$\mathbf{X}_\mu(t_{k+1}) = \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}_\mu(t_k) + \Psi(t_{k+1}, t_k, \mu_k) \mathbf{W}(t_k) + \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \mathbf{N}_x(t_k), \quad \mathbf{X}_\mu(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (20)$$

в котором $\mathbf{N}_x(t_k)$ – вектор формирующих стандартных гауссовских случайных величин с независимыми значениями; Φ_{xx}, Ψ и Γ_x – матрицы, определяемые на основе решения уравнения (19).

Из принимаемых радиосигналов (5) от рабочего созвездия в виде четырех НКА образуем вектор наблюдения $\Xi_1^T = [\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4]$, который на входе СРНС представим в виде

$$\Xi_1(t) = \mathbf{S}[t, \mathbf{Y}(\mathbf{X}(\mu)), \mathbf{\Omega}] + \mathbf{N}_\xi(t), \quad t \in [t_k, t_k + T]; \quad (21)$$

где $\mathbf{S}[t, \mathbf{Y}(\mathbf{X}(\mu)), \mathbf{\Omega}]$ – полезный векторный радиосигнал в виде детерминированной функции времени, условного (по μ) непрерывного $\mathbf{X}(t)$ и двухкомпонентного дискретного $\mathbf{\Omega}(t)$ векторных процессов; $\mathbf{N}_\xi = [n_1, n_2, n_3, n_4]^T$ – вектор белых гауссовских шумов; $\mathbf{Y}(\mathbf{X}(\mu)) = [\mathbf{Y}_1^T(\mathbf{X}(\mu)), \mathbf{Y}_2^T(\mathbf{X}(\mu)), \mathbf{Y}_3^T(\mathbf{X}(\mu)), \mathbf{Y}_4^T(\mathbf{X}(\mu))]^T$ – векторная детерминированная функция, в которой $\mathbf{Y}_i(\mathbf{X}(\mu)) = [D_i(\mathbf{X}(\mu)), \psi_i]^T$, $i = \overline{1, 4}$ – вектор параметров, непосредственно входящих в $\mathbf{S}[*]$.

На тактовых полуинтервалах времени $[t_k, t_{k+1})$ изменение параметров сигналов СРНС, входящих в вектор $\mathbf{X}(t, \mu)$, аппроксимируем, аналогично [10], функциями вида

$$\mathbf{X}_\mu(t) = \mathbf{f}[t, \mathbf{X}, \mu_k, \mathbf{W}_k] = \Phi_{xx}(t, t_k) \mathbf{X}_\mu(t_k) + \Psi(t, t_k, \mu_k) \mathbf{W}(t_k). \quad (22)$$

Полагаем, что в качестве дополнительного наблюдения используются выходные сигналы БВ $\Xi_2 = [Z_{\text{БВ}}]$. Наблюдение $\Xi_2(t_k)$ в дискретные моменты времени $t = kT$, $k = 0, 1, 2, \dots$ имеет вид

$$\Xi_2(t_{k+1}) = \mathbf{H}(t_{k+1}) \mathbf{X}_\mu(t_{k+1}) + U(t_{k+1}), \quad (23)$$

где $\mathbf{H}(t_k)$ – известная матрица; $U(t_k) = [u(t_k)]$ – вектор частично окрашенных шумов (4).

Получим субоптимальные по критерию максимума апостериорного распределения комплексные адаптивные алгоритмы обработки наблюдений (21), (23) с учетом моделей изменения непрерывного процесса (20), (22), двухкомпонентного векторного дискретного процесса (7), (8) и непрерывного параметра (18), характеризующего достоверность навигационных данных, позволяющие оценить вектор непрерывных параметров $\mathbf{X}(t)$, а также идентифицировать значение непрерывного параметра $\mu(t)$ и принять одно из решений о состоянии двухкомпонентного векторного дискретного процесса $\Omega(t)$.

Оптимальные алгоритмы

Сформируем совместный векторный дискретно-непрерывный процесс $[\mathbf{X}^T(t) \Omega^T(t) \mu(t)]$. Оптимальные по любому заданному критерию оценки векторного дискретно-непрерывного процесса $[\mathbf{X}^T(t) \Omega^T(t) \mu(t)]$, например при $t = t_k$, можно найти на основании набора совместных смешанных апостериорных распределений дискретно-непрерывного процесса (ДНП) процесса

$$\begin{aligned} \mathbf{P}[t_k, \mathbf{X}(t_k), \Omega(t_k + 0), \mu(t_k) | \Xi_1^{t_k}, \Xi_2^{t_k}] &= \left\{ p_i[t_k, \mathbf{X}(t_k), \Omega(t_k + 0), \mu(t_k) | \Xi_1^{t_k}, \Xi_2^{t_k}] \right\} = \\ &= \left\{ P[t_k, \mathbf{X}(t_k), \Omega(t_k + 0) = \Omega_i, \mu(t_k) | \Xi_1^{t_k}, \Xi_2^{t_k}] \right\}, \end{aligned}$$

где $\Xi_1^{t_k}$ и $\Xi_2^{t_k}$ – реализации наблюдений (21), (23) на отрезке $[t_0, t_k]$.

Представляя апостериорное смешанное распределения ДНП на полуинтервалах времени $[t_k, t_{k+1})$ в виде [14]

$$\mathbf{P}[t, \mathbf{X}(t_k), \Omega(t_k), \mu(t_k) | \Xi_1^t, \Xi_2^t] = p[t, \mu(t_k) | \Xi_1^t, \Xi_2^t] \mathbf{P}[t, \mathbf{X}(t_k), \Omega(t_k) | \Xi_1^t, \Xi_2^t, \mu(t_k)],$$

где $p[t, \mu(t_{k+1}) | \Xi_1^t, \Xi_2^t]$ – апостериорная плотность вероятности (АПВ) выборки непрерывного процесса $\mu(t)$; $\mathbf{P}[t, \mathbf{X}(t_k), \Omega(t_k) | \Xi_1^t, \Xi_2^t, \mu(t_k)]$ – вектор условных (по $\mu(t_k)$) апостериорных вероятностей совместного ДНП $[\mathbf{X}^T \Omega^T]$, используя для

его нахождения уравнение Стратоновича при представлении АПВ выборки непрерывного процесса $p[t_{k+1}, \mu(t_{k+1}) | \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_{k+1}}]$ в виде [8]

$$p[t_{k+1}, \mu(t_{k+1}) | \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_{k+1}}] = \sum_{i=1}^{N_\mu} P[t_{k+1}, \mu_i(t_{k+1}) | \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_{k+1}}] \times \delta[\mu(t_{k+1}) - \mu_i(t_{k+1})],$$

где N_μ – характеризует число возможных значений, которые может принимать идентифицируемый параметр $\mu(t_{k+1})$, получим необходимые нам соотношения.

Условная (по $\mu_i(t_k)$) АПВ отсчетов $\mathbf{X}(t_{k+1})$ непрерывного процесса в момент времени t_{k+1} с учетом наблюдения (2) находится на основе соотношения

$$\begin{aligned} & p[t_{k+1}, \mathbf{X}(t_{k+1}) | \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_{k+1}}, \mu_i(t_{k+1})] = \\ & = \mathbf{E}^T \mathbf{P}[t_{k+1}, \mathbf{X}(t_{k+1}), \mathbf{\Omega}(t_{k+1} - 0) | \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_{k+1}}, \mu_i(t_{k+1})] = \\ & = \frac{1}{C_2(t_{k+1})} \int \pi_1[\mathbf{X}(t_{k+1}), \Xi_2(t_{k+1}) | \mathbf{X}(t_k), \mu_i(t_k), \Xi_2(t_k)] \times \\ & \quad \times p[t_{k+1} - 0, \mathbf{X}(t_k) | \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_k}, \mu_i(t_k)] d\mathbf{X}(t_k), \end{aligned} \quad (24)$$

в котором

$$\begin{aligned} & p[t_{k+1} - 0, \mathbf{X}(t_k) | \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_k}, \mu_i(t_k)] = \\ & = \frac{1}{rC_2(t_{k+1})} \text{tr} \left\{ \mathbf{\Phi}[t_{k+1} - 0, t_k, \mathbf{X}(t_k), \mu_i(t_k), \mathbf{\Omega}(t_k + 0) | \Xi_1^t, \Xi_2^t] \right\} \times \\ & \quad \times p[t_k + 0, \mathbf{X}(t_k) | \Xi_1^{t_k}, \Xi_2^{t_k}, \mu_i(t_k)], \end{aligned}$$

где $\text{tr}\{*\}$ – след матрицы; $\mathbf{\Phi}[t_{k+1} - 0, t_k, \mathbf{X}(t_k), \mu(t_k), \mathbf{\Omega}(t_k + 0)]$ – диагональная матрица размером $(r \times r)$, элементы которой равны:

$$\Phi_{ii} = \exp \int_{t_k}^{t_{k+1}} F_{ii} d\tau = \exp \int_{t_k}^{t_{k+1}} F[\tau, \mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k, \mu(t_k)), \mathbf{\Omega}(t_k + 0) = \mathbf{\Omega}_i] d\tau, \quad \Phi_{ij} = 0 \quad \text{при } i \neq j;$$

$\mathbf{F}[t, \mathbf{f}(t, \mathbf{X}(t_k), \mu(t_k)), \mathbf{\Omega}(t_k + 0)]$ – диагональная матрица размером $(r \times r)$, элементы которой равны:

$$\begin{aligned} F_{ii} = F[t, \mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k, \mu(t_k)), \mathbf{\Omega}(t_k + 0) = \mathbf{\Omega}_i] = & \left\{ \mathbf{S}^T[t, \mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k, \mu(t_k)), \mathbf{\Omega}(t_k + 0) = \mathbf{\Omega}_i] \mathbf{N}_0^{-1} \times \right. \\ & \left. \times \left[\Xi_1(t) - \frac{1}{2} \mathbf{S}[t, \mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k, \mu(t_k)), \mathbf{\Omega}(t_k + 0) = \mathbf{\Omega}_i] \right] \right\}, \quad F_{ij} = 0 \quad \text{при } i \neq j. \end{aligned}$$

Вектор условных апостериорных вероятностей отсчетов $\mathbf{\Omega}(t_{k+1} - 0)$ двухкомпонентного дискретного процесса в момент времени t_{k+1} с учетом, что вектор

дополнительных наблюдений $\Xi_2(t_{k+1})$ не влияет на апостериорную условную вероятность отсчетов двухкомпонентного дискретного процесса [16], находится на основе соотношения

$$\begin{aligned} & P\left[t_{k+1} - 0, \Omega(t_k + 0) \mid \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_k}, \mathbf{X}(t_k), \mu_i(t_k)\right] = \\ & = \frac{\Phi\left[t_{k+1} - 0, t_k, \mathbf{X}(t_k), \mu_i(t_k), \Omega(t_k + 0) \mid \Xi_1^t, \Xi_2^{t_k}\right] \mathbf{E}}{\text{tr}\left\{\Phi\left[t_{k+1} - 0, t_k, \mathbf{X}(t_k), \mu_i(t_k), \Omega(t_k + 0) \mid \Xi_1^t, \Xi_2^{t_k}\right]\right\}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Апостериорная вероятность значений параметра $\mu_i(t_{k+1})$, $i = \overline{1, N_\mu}$ определяется выражением

$$\begin{aligned} & P\left[t_{k+1}, \mu_i(t_{k+1}) \mid \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_{k+1}}\right] = \\ & = \frac{1}{rC_3(t_{k+1})} P\left[t_k, \mu_i(t_k) \mid \Xi_1^{t_k}, \Xi_2^{t_k}\right] \mathbf{E}^T \int \pi_1\left[\Xi_2(t_{k+1}) \mid \mathbf{X}(t_k), \mu_i(t_k), \Xi_2(t_k)\right] \times \\ & \times \Phi\left[t_{k+1} - 0, t_k, \mathbf{X}(t_k), \mu_i(t_k), \Omega(t_k + 0) \mid \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_k}\right] \mathbf{E} P\left[t_k + 0, \mathbf{X}(t_k) \mid \Xi_1^{t_k}, \Xi_2^{t_k}, \mu_i(t_k)\right] d\mathbf{X}(t_k). \end{aligned} \quad (26)$$

Схема обработки информации, разработанная в соответствии с полученными выражениями (24) – (26), представлена на рис. 1.

В составе схемы можно выделить N_μ независимых каналов обработки информации, на вход которых поступают векторы наблюдения $\Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_{k+1}}$. Вектор $\Xi_1^{t_{k+1}}$ сформирован из принимаемых радиосигналов четырех НКА рабочей звезды, в качестве вектора наблюдения $\Xi_2^{t_{k+1}}$ используются выходные сигналы БВ. В каждом канале обработки происходит вычисление вектора условных апостериорных вероятностей отсчетов двухкомпонентного дискретного параметра

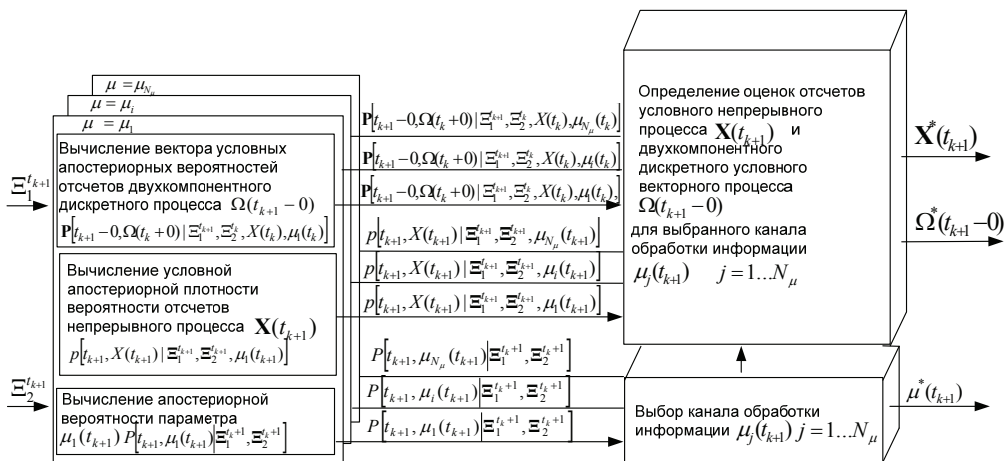


Рис. 1. Схема обработки информации

$\Omega(t_{k+1}-0)$, условной АПВ отсчетов непрерывного параметра $\mathbf{X}(t_{k+1})$ и апостериорной вероятности параметра $\mu_i(t_k)$. Выбор канала обработки информации заключается в сравнении апостериорных вероятностей $P\left[t_{k+1}, \mu_i(t_{k+1}) \mid \Xi_1^{t_{k+1}}, \Xi_2^{t_{k+1}}\right]$, вычисленных для каждого канала, и выборе канала, где апостериорная вероятность максимальна, на основе которой вычисляется оценка $\mu_i^*(t_k)$. Для выбранного канала найденные на основании выражений (24) и (25) значения условной (по $\mu_i(t_k)$) АПВ непрерывного процесса и вектора условных апостериорных вероятностей двухкомпонентного дискретного процесса используются для определения оптимальных оценок отсчетов условного непрерывного процесса $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$ и двухкомпонентного дискретного условного векторного процесса $\Omega^*(t_{k+1}-0)$ с помощью процедуры определения глобальных максимумов этих функций по соответствующим переменным.

Таким образом, методами марковской теории оценивания случайных процессов получены оптимальные по критерию максимума апостериорного распределения комплексные алгоритмы совместного обнаружения, адаптивного оценивания и идентификации, позволяющие, помимо оценки состояния радионавигационного поля сигналов СРНС и поля ССИ, также решать задачу адаптивного оценивания и идентификации навигационных данных.

Список литературы

1. Система топографического ориентирования «Трона-1» // Обзорение армии и флота. – 2007. – № 4. – С. 30.
2. Автоматизированный навигационно-телекоммуникационный комплекс для высокоточного позиционирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.mriprogress.ru/_files/G11.pdf (дата обращения: 01.02.2018).
3. КомпаНав-2Т. Малогабаритная интегрированная навигационная система для наземного применения. Описание системы [Электронный ресурс]. 2009. – Режим доступа : http://www.teknol.ru/pdf/rus/CN-2T_description_rus.pdf (дата обращения: 01.02.2018).
4. Иванов, А. В. Навигация наземных объектов / А. В. Иванов, Н. А. Иванова. – Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 120 с.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В.И. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2010. – 800 с.
6. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
7. Данилов, С. Н. Алгоритм функционирования системы угловой коррекции наземной подвижной антенны, синтезированный на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013. – № 9. С. 55 – 59.
8. Алгоритм дальномерного канала с учетом информации бортовых датчиков воздушных судов / Ю. Н. Панасюк, С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, И. В. Князев // Радиотехника. – 2013. – № 9. С. 60 – 63.
9. Панасюк, Ю. Н. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах : учеб. пособие / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. – 84 с.

10. Иванов, А. В. Алгоритмы обработки информации в навигационных системах наземных подвижных объектов с контролем целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем / А. В. Иванов, Д. В. Комраков, В. О. Сурков // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № 52. – С. 53 – 58.
11. Иванов, А. В. Точностные характеристики навигационных комплексов, использующих контроль целостности спутниковых радионавигационных систем для реконфигурации / А. В. Иванов, Д. В. Комраков, С. П. Москвитин, В. А. Чернышов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, №4. – С. 572 – 577.
12. Ярлыков, М. С. Статистическая теория радионавигации / М. С. Ярлыков. – М. : Радио и связь, 1985. – 344 с.
13. Бабич, О. А. Обработка информации в навигационных комплексах / О. А. Бабич. – М. : Машиностроение, 1991. – 512 с.
14. Иванов, А. В. Обработка сигналов спутниковых радионавигационных систем в бортовом навигационно-посадочном комплексе / А. В. Иванов // Радиотехника. – 2001. – № 10. – С. 29 – 36.
15. Ярлыков, М. С. Помехоустойчивый навигационно-посадочный комплекс на основе спутниковой радионавигационной системы / М. С. Ярлыков, А. А. Базаров, С. С. Салямех // Радиотехника. – 1996. – № 12. – С. 3 – 11.
16. Иванов, А. В. Обработка многомерных сигналов. Нелинейная многомерная обработка сигналов спутниковых радионавигационных систем в комплексах самолетовождения / А. В. Иванов. – М. : Радиотехника, 2012. – 176 с.

Adaptive Estimation and Identification of Signals of Satellite Radio Navigation Systems

A. V. Ivanov, S. P. Moskvitin, V. O. Surkov

*Department of Radio Engineering, TSTU, Tambov, Russia;
aleksandr-ivanov68@yandex.ru*

Keywords: identification; adaptive estimation; discrete-continuous process; Markov theory of estimating random processes.

Abstract: Using the methods of the Markov's theory of estimating random processes, the problem of obtaining complex optimal algorithms for adaptive estimation and identification of signals of satellite radio navigation systems is reduced to the problem of identification and adaptive estimation of discrete-continuous processes. The discrete process is a two-component composite process, each component of which is a vector process. A non-continuous process is a multicomponent diffusion process. The problem of identification is considered as a parametric estimation problem.

References

1. *Obozrenie armii i flota* [Review of the army and navy], 2007, no. 4, pp. 30. (In Russ.)
2. http://www.mriprogress.ru/_files/G11.pdf (accessed 01 February 2018).
3. *KompaNav-2T. Malogabaritnaya integrirovannaya navigatsionnaya sistema dlya nazemnogo primeneniya. Opisaniye sistemy* [CompaNav-2T. Small-scale integrated navigation system for terrestrial applications. Description of the system], 2009, http://www.teknol.ru/pdf/rus/CN-2T_description_rus.pdf (accessed 01 February 2018).

4. Ivanov A.V., Ivanova N.A. *Navigatsiya nazemnykh ob"ektov* [Navigation of ground objects], LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 120 p. (In Russ.)
5. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and operation], Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p. (In Russ.)
6. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnye metody obrabotki informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Perspective methods of information processing in radio engineering systems], St. Petersburg: Ekspertnye resheniya, 2014, 256 p. (In Russ.)
7. Danilov S.N., Pudovkin A.P., Panasyuk Yu.N. [Algorithm of functioning of the angular correction system of a ground mobile antenna, synthesized on the basis of systems with a random change in the structure], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2013, no. 9, pp. 55-59. (In Russ.)
8. Panasyuk Yu.N., Danilov S.N., Pudovkin A.P., Knyazev I.V. [The algorithm of a range-measuring channel taking into account information of airborne sensors of aircrafts], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2013, no. 9, pp. 60-63. (In Russ.)
9. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P. *Obrabotka radiolokatsionnoi informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Processing radar information in radio engineering systems], Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2016, 84 p. (In Russ.)
10. Ivanov A.V., Komrakov D.V., Surkov V.O. [Algorithms for processing information in navigational systems of surface mobile objects with control of the integrity of navigation data of satellite radio navigation systems], *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. 52, pp. 53-58. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Ivanov A.V., Komrakov D.V., Moskvitin S.P., Chernyshov V.A. [Precision characteristics of navigation systems using the integrity monitoring of satellite radio navigation systems for reconfiguration], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 572-577. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Yarlykov M.S. *Statisticheskaya teoriya radionavigatsii* [Statistical theory of radio navigation], Moscow: Radio i svyaz', 1985, 344 p. (In Russ.)
13. Babich O.A. *Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh* [Information processing in navigation complexes], Moscow: Mashinostroenie, 1991, 512 p.
14. Ivanov A.V. [Processing of signals of satellite radio navigation systems in the onboard navigation and landing complex], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2001, no. 10, pp. 29-36. (In Russ.)
15. Yarlykov M.S., Bazarov A.A., Salyamekh S.S. [Interference-free navigation and landing system based on the satellite radio navigation system], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 1996, no. 12, pp. 3-11. (In Russ.)
16. Ivanov A.V. *Obrabotka mnogomernykh signalov. Nelineinaya mnogomernaya obrabotka signalov sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v kompleksakh samoletovozhdeniya* [Processing of multidimensional signals. Nonlinear multidimensional processing of signals of satellite radio navigation systems in navigation complexes], Moscow: Radiotekhnika, 2012. 176 p. (In Russ.)

Adaptive Bewertung und Identifizierung der Satellitenradionavigationssysteme in Navigationssystemen

Zusammenfassung: Mit Hilfe der Methoden der Markov-Theorie zur Bewertung zufälliger Prozesse ist die Aufgabe gelöst, komplexe optimale Algorithmen zur adaptiven Bewertung und Identifikation von Signalen von Satellitenfunknavigationssystemen zu erhalten, die auf das Problem der Identifizierung und adaptiven Bewertung

von diskret-kontinuierlichen Prozessen zurückzuführen ist. Der diskrete Prozess stellt einen Zweikomponenten-Verbundprozess dar, bei dem jede Komponente ein Vektorprozess ist. Ein kontinuierlicher Prozess ist ein Mehrkomponenten-Diffusionsprozess. Das Identifikationsproblem wird als Aufgabe der parametrischen Bewertung betrachtet.

Évaluation adaptative et identification des signaux des systèmes de satellites radionavigués dans les systèmes de navigation

Résumé: Par les méthodes de l'évaluation des processus aléatoires de la théorie de Markov est résolue la tâche de l'obtention des meilleurs algorithmes optimaux complexes de l'évaluation et de l'identification des signaux des systèmes des satellites radionavigués qui aboutit à une tâche de l'identification et de l'évaluation des processus discrets continus. Le processus discret présente un processus bi-composant et chaque composant est un processus de vecteur. Le processus continu est un processus multicomposant de diffusion. La tâche de l'identification est considérée comme un problème de l'évaluation paramétrique.

Авторы: *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника»; *Москвитин Сергей Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Сурков Владимир Олегович* – ассистент кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбова, Россия.

Рецензент: *Чернышева Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор, директор Института энергетики, приборостроения и радиоэлектроники, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбова, Россия.
