

УДК 681.518.5

КОНТРОЛЬ И ПАРИРОВАНИЕ НАРУШЕНИЙ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ КРИТЕРИЕВ СОГЛАСИЯ*

А.В. ЧЕРНОДАРОВ

Работа посвящена проблеме повышения достоверности, оперативности и глубины диагностирования интегрированных навигационных систем (ИНС). Предлагаемые решения проблемы опираются на декомпозицию диагностических моделей ИНС, применение комбинированных критериев согласия и обработку наблюдений в «прямом» и «обратном» времени. Приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: навигационная система, контроль, критерии согласия, парирование нарушений.

Введение

Современное состояние авиационного оборудования (АО) характеризуется внедрением навигационных комплексов (НК) нового поколения [1]. Ядром таких НК являются интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы (ИСНС) на базе квантово-оптических измерителей: лазерных и волоконно-оптических гироскопов. В настоящее время актуальной остается проблема повышения информационной надежности [2] ИСНС. Аналитические подходы к решению указанной проблемы опираются на применение диагностических моделей для обнаружения, парирования и предотвращения нарушений. Технология формирования таких моделей опирается на математическое описание функционирования эталонной (невозмущенной) и реальной (возмущенной) ИСНС, которым ставятся в соответствие идеальный $Y(t)$ и реальный $Y_p(t)$ векторы параметров состояния. Динамика изменения указанных векторов описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\text{для идеальной ИСНС} \quad \dot{Y}(t) = F[Y(t)]; \quad (1)$$

$$\text{для реальной ИСНС} \quad \dot{Y}_p(t) = F[Y_p(t)] + G(t)\xi(t), \quad (2)$$

где $\xi(t) = [\xi_1(t) \dots \xi_r(t)]^T$ – вектор возмущений, действующих на ИСНС, характеризующийся ковариационной матрицей $M[\xi(t)\xi^T(t-\tau)] = Q(t)\delta(t-\tau)$; $\delta(t-\tau)$ – дельта-функция; $M[\dots]$ – оператор математического ожидания; $G(t)$ – матрица интенсивностей возмущений.

Параметры идеальной и реальной ИСНС связаны через уравнение ошибок

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + G(t)\xi(t), \quad (3)$$

где $x(t) = \Delta Y(t) = Y_p(t) - Y(t)$ – вектор ошибок ИСНС; $A(t) = \frac{\partial F[Y_p(t)]}{\partial Y}$ – матрица коэффициентов, характеризующих динамику изменения ошибок ИСНС.

Оценки $\hat{x}(t)$ ошибок ИСНС могут быть получены с помощью оптимального фильтра Калмана (ОФК) [3] путем обработки наблюдений

$$z(t) = h[Y_p(t)] - h[Y(t)]_{\text{двн}}, \quad (4)$$

где $h[Y(t)]_{\text{двн}}$ – измерение, сформированное датчиком внешней по отношению к ИСНС ин-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 14-08-01173.

формации (ДВИ), имеющее модель $h[Y(t)]_{\text{ДВИ}} = h[Y(t)] + \mathcal{G}(t)$; $\mathcal{G}(t)$ – вектор возмущений в канале измерений, имеющий ковариационную матрицу $M[\mathcal{G}(t)\mathcal{G}^T(t-\tau)] = R(t)\delta(t-\tau)$.

В ОФК взаимосвязь наблюдений (4) с ошибками динамической системы (ДС) учитывается через математическую модель

$$z(t) = H(t)x(t) + \mathcal{G}(t), \quad (5)$$

где $H(t) = \frac{\partial h[Y(t)]}{\partial Y}$ – матрица связи наблюдаемых параметров с вектором ошибок ИСНС.

Если спутниковую навигационную систему (СНС) рассматривать в качестве ДВИ для инерциальной, то схема ИСНС может быть представлена рис. 1, где АСК – автоматизированная система контроля; ПК – преобразователь координат; \wedge – символ оценки.

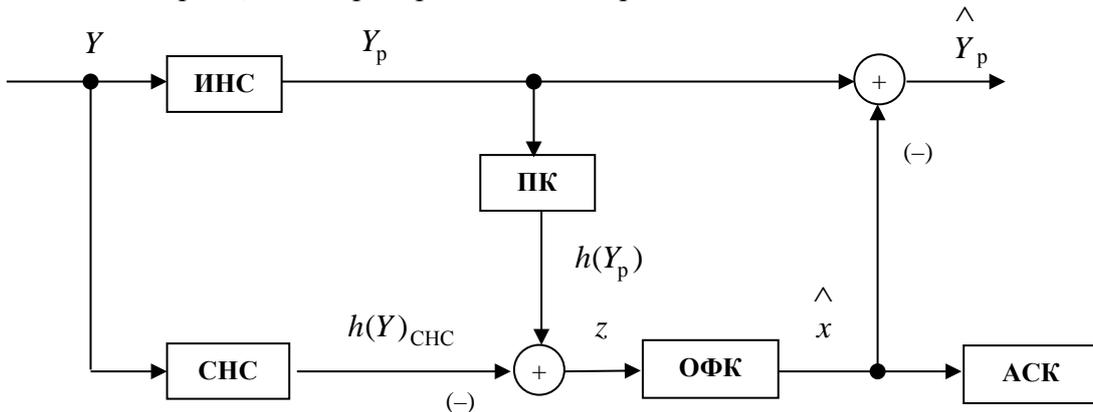


Рис. 1. Структурная схема интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы

Функционирование АСК может быть основано на оценивании ошибок ИНС. Однако в этом случае каждому множеству технических состояний ИНС необходимо будет ставить в соответствие свои уравнения вида (3). Кроме того, возникает задача согласования текущего состояния ИНС с соответствующей моделью из «банка» оценивающих фильтров [2; 3], что трудно реализуемо на практике. Поэтому алгоритмы контроля целесообразно строить на основе уравнений вида (3), настроенных на исправное состояние ИНС. С учетом этого могут быть сформированы диагностические параметры, которые должны отражать отклонение реального состояния ИНС от исправного.

Цель работы – повышение достоверности и глубины контроля ИСНС на основе комбинированных критериев согласия.

1. Контроль по критерию χ^2

Статистические свойства ОФК позволяют сформировать диагностические параметры на базе вектора невязок

$$v_i = z_i - H_i \Phi_i \hat{x}_{i-1} = [v_{1(i)} v_{2(i)} \dots v_{j(i)} \dots v_{l(i)}]^T, \quad (6)$$

где $z_i = z(t_i)$ – вектор наблюдений в i -й момент времени; Φ_i – переходная матрица для вектора ошибок ИНС, определяемая из решения дифференциального уравнения

$$\dot{\Phi}_i = A(t)\Phi(t, t_{i-1})$$

при $\Phi(t, t_{i-1}) = E$ – единичная матрица.

Известно [3; 4], что в ДС, модель ошибок которой настроена на исправное состояние, при отсутствии нарушений вектор невязок имеет гауссовское распределение с нулевым математи-

ческим ожиданием и ковариационной матрицей α_i , то есть

$$v_i \in N(0, \alpha_i). \quad (7)$$

Учитывая принцип ортогональности оптимальных оценок $M[e_i \mathcal{G}_i^T] = 0$, можно показать, что

$$\alpha_i = M[v_i v_i^T] = H_i \Phi_i P_{i-1} \Phi_i^T H_i^T + R_i, \quad (8)$$

где $P_i = M[e_i e_i^T]$; $e_i = x_i - \hat{x}_i$.

Применение традиционного ОФК предполагает одновременную обработку всех элементов вектора наблюдения z_i с учетом прогнозных значений оценок $\hat{x}_{i/i-1}$. Поэтому для контроля состояния ИНС необходимо было бы проверять, является ли вектор v_i l -мерной гауссовской последовательностью. Однако на практике решение данной задачи затруднительно. В связи с этим на базе вектора невязок формируют более компактные в вычислительном отношении диагностические параметры. Такие параметры опираются на вертку вектора невязок v_i и ковариационной матрицы α_i

$$J_i = v_i^T \alpha_i^{-1} v_i. \quad (9)$$

В квадратичной форме (9) элементы матрицы α_i рассматриваются как нормирующие коэффициенты, учитывающие информацию о требуемых статистических характеристиках ИНС.

Можно показать [4], что для вектора невязок v_i с гауссовским распределением квадратичная форма (9) имеет распределение χ^2 с l степенями свободы

$$J_i \in \chi^2(l, 2l), \quad (10)$$

то есть размерность вектора невязок l равна математическому ожиданию параметра J_i и половине его дисперсии.

Правильному функционированию ИНС можно поставить в соответствие область допустимых значений параметра J_i . Можно показать [5], что с доверительной вероятностью 0,98 необходимым условием принадлежности параметра J_i к распределению χ^2 является следующее

$$J_i \leq \gamma_l^2 = M[J_i] + 3\sqrt{D[J_i]} = l + 3\sqrt{2l}, \quad (11)$$

где $D[\dots]$ – оператор дисперсии.

Таким образом, величина γ_l^2 определяет область допустимых значений параметра J_i при правильном функционировании ДС. С учетом допуска γ_l^2 контроль ДС по обобщенному параметру на основе критерия χ^2 сводится к проверке следующих условий:

$$\begin{cases} \text{если } J_i \leq \gamma_l^2, \text{ то в ДС нет нарушений;} \\ \text{если } J_i > \gamma_l^2, \text{ то в ДС есть нарушения.} \end{cases} \quad (12)$$

Контроль по обобщенному параметру J_i позволяет оценить состояние ИНС в целом, без анализа, по какому из параметров вектора наблюдений наиболее вероятно произошло нарушение. На практике возникает необходимость оценки состояния ИНС по каждому из

элементов вектора z_i , то есть выполнить диагностирование ИНС с глубиной до наблюдаемого параметра.

2. Диагностирование по критерию χ^2

Задача диагностирования может быть решена, если ошибки наблюдений статистически независимы, то есть матрица R_i в соотношении (8) является диагональной. Если наблюдения взаимно коррелированы, то выполняется их предварительная декомпозиция [5]. С учетом этого представляется возможным выполнять поканальную (поэлементную) обработку вектора наблюдений (6) и анализировать состояние каждого из l измерительных каналов. Например, для контроля j -го измерительного канала может быть использована нормированная невязка $\beta_j = v_j / \alpha_j$, где α_j – параметр масштаба; $j = \overline{1, l}$. При обработке наблюдений в «прямом» времени невязка v_j представляет собой разность $v_j = z_j - \hat{z}_j$ между реальным z_j и прогнозируемым $\hat{z}_j = H_j \hat{m}_j$ значениями наблюдений, где m_j , $\hat{x}_{i/i}$ – оценки вектора ошибок ДС x_i на i -м шаге после обработки соответственно j -го элемента и всего вектора наблюдений z_i ; H_j – вектор-строка коэффициентов связи. Статистические свойства параметра β_j^2 могут быть использованы для построения решающих правил. Для него по аналогии с обобщенным параметром (9) при $l=1$ может быть сформировано необходимое условие правильного функционирования ИНС по каждому из каналов наблюдений, а именно

$$\beta_j^2 \in \chi^2(1, 2) \quad (13)$$

или по правилу 3σ для квантиля $a(1) = 0,02$

$$\beta_j^2 \leq \gamma_1^2 = M[\beta_j^2] + 3\sqrt{D[\beta_j^2]} = 1 + 3\sqrt{2} \cong 5,2. \quad (14)$$

С учетом допуска γ_1^2 диагностирование по критерию χ^2 сводится к следующим проверкам:

$$\begin{cases} \text{если } \beta_j^2 \leq \gamma_1^2, \text{ то в ДС по } j\text{-му каналу наблюдений нет нарушений;} \\ \text{если } \beta_j^2 > \gamma_1^2, \text{ то в ДС по } j\text{-му каналу наблюдений есть нарушения.} \end{cases} \quad (15)$$

3. Диагностирование по критерию \mathcal{G}^2

Применение критерия χ^2 позволяет обнаруживать текущие нарушения в ДС. На практике возникает также необходимость анализировать информацию о функционировании ДС за определенный период времени. На основе ретроспективных данных могут определяться соответствующие диагностические параметры. Технология последовательной обработки наблюдений позволяет формировать такие параметры по выборке невязок на скользящем временном интервале. Для этого могут быть использованы эргодические свойства ОФК, априорно настроенного на правильное функционирование ИНС. Такими параметрами являются дисперсии невязок в каждом из l каналов наблюдений. Прогнозируемое значение дисперсии α_j в j -м канале наблюдений в i -й момент времени определяется по соотношению (8),

$$\text{а ее оценка } \hat{\alpha}_{j(i)} \text{ – по реальной выборке невязок } \hat{\alpha}_{j(i)} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=i-N+1}^i [v_{j(k)} - \bar{v}_{j(i)}]^2; \quad j = \overline{1, l},$$

где $v_{j(i)} = \frac{1}{N} \sum_{k=i-N+1}^i v_{j(k)}$ – оценка математического ожидания невязки в j -м канале наблюдений в i -й момент времени; N – количество отсчетов на скользящем интервале $T = [t_{i-N+1}, t_i]$.

В качестве параметра, характеризующего состояние ДС на временном интервале T , может быть принято отношение реальной $\hat{\alpha}_j$ и прогнозируемой α_j дисперсий

$$F_j = \hat{\alpha}_j / \alpha_j. \quad (16)$$

Известно [5], что при выполнении условия (7) параметр (16) имеет распределение \mathcal{F}^2 , а именно

$$F_j \in \mathcal{F}^2(a, b), \quad (17)$$

где $a = N / (N - 2)$; $b = 4N(N - 1) / [(N - 2)^2(N - 4)]$.

Используя правило 3σ , условие (17) может быть представлено в виде

$$F_j \leq \eta_1^2 = M[F_j] + 3\sqrt{D[F_j]} = a + 3\sqrt{b}. \quad (18)$$

С учетом допуска η_1^2 технология поканального контроля ДС по критерию \mathcal{F}^2 имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } F_j \leq \eta_1^2, \text{ то в ДС по } j\text{-му каналу наблюдений на интервале } T \text{ не было нарушений;} \\ \text{если } F_j > \eta_1^2, \text{ то в ДС по } j\text{-му каналу наблюдений на интервале } T \text{ были нарушения.} \end{array} \right. \quad (19)$$

Процедура (19) дополняет проверку (15) для повышения достоверности диагностирования.

4. Диагностирование по комбинированному критерию χ^2 / \mathcal{F}^2

При реализации процедур диагностирования ИНС возникает задача обнаружения кратковременных сбоев на фоне отказов. При различении таких нарушений представляется возможным парировать случайные сбои, не отключая ИНС. Решение указанной задачи может быть основано на комплексировании критериев χ^2 и \mathcal{F}^2 . Действительно, диагностирование по критерию χ^2 позволяет обнаруживать как сбои, так и отказы. Диагностический параметр F_j , формируемый по критерию \mathcal{F}^2 , определяется по множеству невязок V_j на скользящем временном интервале. Сбойные сигналы, используемые для вычисления такого параметра, усредняются и несущественно влияют на результаты диагностирования по критерию \mathcal{F}^2 . В то же время постепенные и внезапные отказы, характеризующиеся постоянными смещениями невязок относительно их номинальных значений, приводят к отклонению параметра F_j от допуска. Поэтому, если нарушения выявляются по обоим критериям, то в j -м канале наблюдений наиболее вероятно произошел отказ, если только по критерию χ^2 – то сбой. Парирование нарушений сводится к следующему. При отсутствии разладки невязка v_j обрабатывается ОФК, парирование отказа осуществляется путём подключения резервного канала, а парирова-

ние кратковременного сбоя – путём адаптивно-робастной фильтрации (АРФ) невязок с использованием функции влияния $\psi(\beta)$. Указанная функция определяет уровень доверия к поступающим измерениям. В работе [5] предложены и обоснованы следующие значения функции $\psi(\beta)$, учитывающие априорные предположения о законах распределений полезного сигнала и помехи:

$$\psi_g(\beta_j) = \beta_j; \quad \psi'_g(\beta_j) = 1 - \text{для кондционных невязок } 0 \leq \beta_j \leq 3 \text{ (ОФК);}$$

$$\psi_l(\beta_j) = |\beta_j|; \quad \psi'_l(\beta_j) = 0 - \text{для аномальных невязок } \beta_j > 6 \text{ (АРФ);}$$

$$\psi_{lg}(\beta_j) = \beta_j/3; \quad \psi'_{lg}(\beta_j) = 1/3 - \text{для невязок с неопределенностью } 3 < \beta_j \leq 6 \text{ (АРФ).}$$

Приведенные процедуры позволяют выполнить диагностирование ИНС с глубиной до элемента вектора невязок v_i . В то же время на практике возникает необходимость обнаруживать нарушения по каждому элементу вектора состояния ИНС.

5. Диагностирование динамических систем на основе обработки данных в «прямом» и «обратном» времени

Диагностирование ИНС с глубиной до элементов вектора состояния (ВС) может быть выполнено на основе совместной обработки сигналов наблюдений в «прямом» (фильтрация) и «обратном» (сглаживание) времени. Обобщённые параметры, реагирующие на разладку оценок ВС, конструктивно входят в следующую квадратичную форму

$$J_i = v_{i/N}^T \Delta P_i^{-1} v_{i/N}, \quad (20)$$

где $v_{i/N} = \delta_{f(i)} - \delta_{s(i)} = \Phi_{i+1}^{-1} \hat{x}_{i+1/N} - \hat{x}_{i/i}$; $\delta_{f(i)} = x_i - \hat{x}_{i/i}$; $\Delta P_i = P_{i/i} + \Phi_{i/N}^{-1} P_{i+1/N} \Phi^{-T}_{i/N}$; $\hat{x}_{i/i}, \hat{x}_{i/N}$ – оценки ВС x_i в i -й момент времени по i наблюдениям, полученные соответственно на этапах фильтрации и сглаживания; $P_{i/i}, P_{i/N}$ – ковариационные матрицы данных оценок; $\Phi_{i/N}$ – переходная матрица для ВС; $\Phi^{-T} = (\Phi^{-1})^T$.

Устойчивое сглаживание ($|\delta| < 3\sigma$), отражающее исправное состояние ДС, характеризуется следующими распределениями невязки $v_{i/N}$ и квадратичной формы J_i :

$$v_{i/N} \in N(0; \Delta P_i); \quad J_i \in \chi^2(n; 2n),$$

где n – размерность ВС.

С учетом статистических свойств распределения χ^2 и правила 3σ могут быть сформированы необходимые условия исправного состояния (отсутствие сбоев и отказов) ДС в целом $J_i \leq n + 3\sqrt{2n}$ и j -го элемента ВС в частности

$$J_{i(j)} = J_{i(j-1)} + \vartheta_{i/N(j)}^2 / \Delta D_{i(j)} \leq \gamma_j^2 = j + 3\sqrt{2j}, \quad (21)$$

где $\vartheta_{i/N} = \Delta U_i^{-1} v_{i/N}$; $\Delta U_i^{-1}; \Delta D_i^{-1}$ – соответственно верхняя треугольная с единичной диагональю и диагональная матрицы, получаемые путем ортогонального преобразования

$$\Delta P_i^{-1} = \Delta U_i^{-T} \Delta D_i^{-1} \Delta U_i^{-1}, \quad (22)$$

где $\Delta D_{i(j)}^{-1}$ – j -й элемент диагональной матрицы ΔD_i^{-1} .

С учетом разложения (22) и свойств статистики Фишера [5] $F_j = \frac{\hat{\alpha}_{(i/j)}}{\Delta D_{(i/j)}} \in \mathcal{G}^2(a, b)$ может быть сформировано необходимое условие работоспособного состояния (отсутствие отказов) ИНС по j -му элементу ВС $F_j \leq \eta_j^2 = a + 3\sqrt{b}$, где $\hat{\alpha}_{(i/j)}$ – оценка дисперсии невязки $\mathcal{V}_{i/N(j)}$ на скользящем временном интервале.

6. Анализ результатов исследований

В качестве объекта контроля рассматривается одноканальная ИНС [5]. В такой ИНС моделируется маятник Шулера системой “гироскоп-акселерометр” (Г-А). В Г-А системе обеспечивается инвариантность моделируемой вертикали к движению основания акселерометра относительно Земли при вычислении скорости и угловой координаты (например, географической широты φ). Для этого на датчик момента гироскопа подается сигнал, пропорциональный угловой скорости перемещения ИНС относительно земной поверхности $\dot{\varphi} = V/R$.

При наблюдении вектора ошибок такой системы $x(t) = [\Delta V \ \delta \ \Delta a \ \Delta \omega]^T$ по сигналам скорости $z(t) = V_{\text{ИНС}}(t) - V_{\text{СНС}}(t)$ параметры уравнений (3), (5) будут иметь вид:

$$H(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & -g & 1 & 0 \\ 1/R & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1/\tau_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau_\omega \end{bmatrix}; \quad G(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_a \sqrt{2/\tau_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_\omega \sqrt{2/\tau_\omega} \end{bmatrix},$$

где R – величина радиус-вектора местоположения Г-А системы; g – ускорение силы тяжести; δ – ошибка определения вертикали; ΔV – ошибка счисления скорости; Δa – ошибка акселерометра; $\Delta \omega$ – дрейф гироскопа; τ_a, τ_ω – соответственно время корреляции ошибки акселерометра и дрейфа гироскопа; σ_a, σ_ω – среднеквадратические значения ошибок соответственно акселерометра и гироскопа. На рис. 2, 3 представлены характерные результаты исследований. Имитировался отказ акселерометра на 500-й секунде. Такой отказ косвенно проявляется в канале наблюдения скорости, когда обобщенный параметр β_V^2 превышает допуск. При обработке зарегистрированных оценок и диагностировании по правилу (21) определяется, какой из чувствительных элементов ИНС: акселерометр или гироскоп, наиболее вероятно привел к нарушению. На рис. 2, 3 показана динамика изменения оценок смещения сигнала акселерометра a_x и дрейфа гироскопа ω_x при обработке наблюдений скорости в «прямом» времени и уточнении указанных оценок в «обратном» времени. При диагностировании по зарегистрированным данным отказавший акселерометр локализуется при превышении допусков обобщенными параметрами J_{Sa_j} (критерий χ^2) и F_{Sa_j} (критерий \mathcal{G}^2).

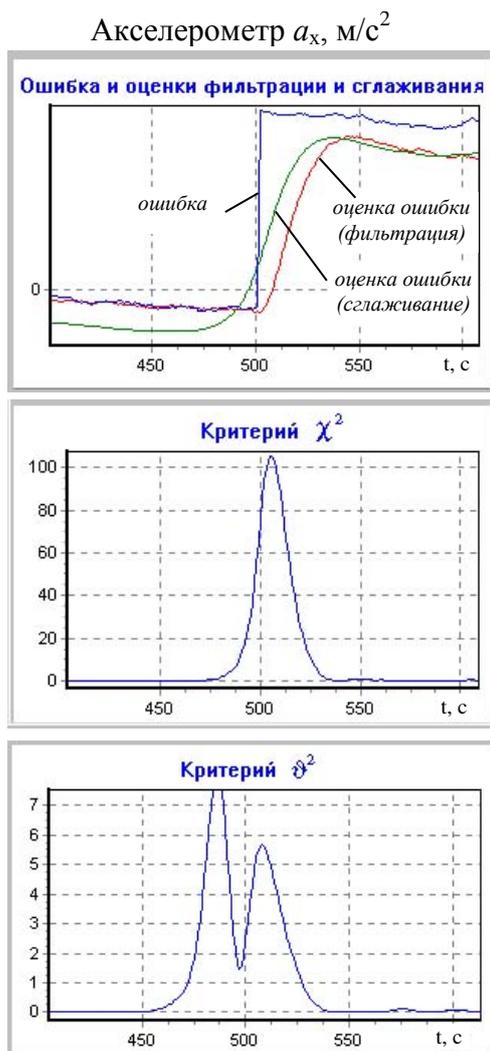


Рис. 2. Оценки ошибки акселерометра

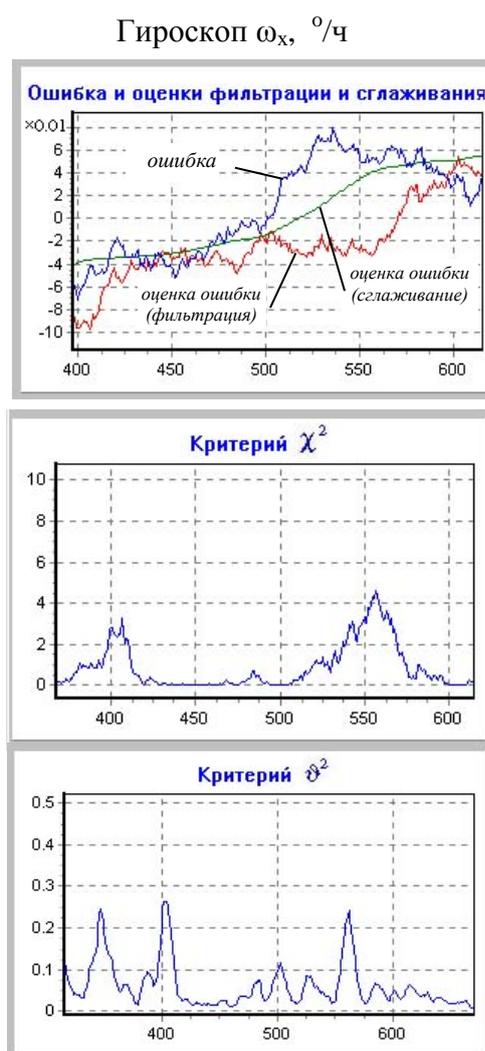


Рис. 3. Оценки дрейфа гироскопа

Заключение

Можно также видеть, что отказ акселерометра несущественно повлиял на изменение параметров $J_{S\omega_j}$ и $F_{S\omega_j}$, характеризующих состояние гироскопа ω_x . Таким образом, комбинированная обработка наблюдений в «прямом» и «обратном» времени позволяет решать задачи диагностирования с глубиной до элемента вектора состояния ИНС.

Представленная технология диагностирования позволяет: обнаруживать нарушения в наблюдаемых динамических системах АО с глубиной до элемента вектора состояния на основе совместных процедур оптимальной фильтрации и сглаживания экспериментальных данных; повышать достоверность и оперативность обнаружения нарушений путем анализа обобщенных параметров состояния по комбинированным критериям согласия; селективировать и парировать кратковременные сбои на фоне отказов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веремеенко К.К., Кошелев Б.В., Соловьев Ю.А. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // *Новости навигации*. 2010. № 4. С. 32-41.

2. **Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В.** Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003.
3. **Бабич О.А.** Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991.
4. **Gertler J.J.** *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. N.Y.: Marcel Dekker, 1998.
5. **Колодежный Л.П., Чернодаров А.В.** Надежность и техническая диагностика. М.: Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010.
6. **Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф.** Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, ГРФМЛ, 1985.

MONITORING AND COUNTERACTION AGAINST FAULTS IN INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS BY THE USE OF COMBINED GOODNESS-OF-FIT TESTS

Chernodarov A.V.

This paper is devoted to the problem of increasing the diagnosis confidence, diagnosis operativeness, and diagnosis depth in observable dynamical systems (DSs). The proposed solution of the above problem relies on the decomposition of DS diagnostic models, on the application of combined goodness-of-fit tests, and on the processing of observations in “forward” and “backward” time. The results of modelling are given.

Keywords: navigation system, control, diagnostics, parry violations criteria consent.

REFERENCES

1. **Veremeyenko K.K., Koshelev B.V., Solov'yev Yu.A.** Analiz sostoyaniya razrabotok integrirovannykh inertial'no-sputnikovykh navigatsionnykh system. *Novosti navigatsii*. 2010. № 4. Pp. 32-41. (In Russian).
2. **Dmitriyev S.P., Kolesov N.V., Osipov A.V.** *Informatsionnaya nadezhnost', kontrol' i diagnostika navigatsionnykh sistem*. SPb.: GNTS RF – TSNII «Elektropribor». 2003. (In Russian).
3. **Babich O.A.** *Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh*. M.: Mashinostroyeniye. 1991. (In Russian).
4. **Gertler J.J.** *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. N.Y.: Marcel Dekker. 1998.
5. **Kolodezhnyy L.P., Chernodarov A.V.** *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika*. M.: Voenno-vozdushnaya akademiya im. N.Ye. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina. 2010. (In Russian).
6. **Korolyuk V.S., Portenko N.I., Skorokhod A.V., Turbin A.F.** *Spravochnik po teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistike*. M.: Nauka, GRFML. 1985. (In Russian).

Сведения об авторе

Чернодаров Александр Владимирович, 1951 г.р., окончил Рижское ВВАИУ им. Я. Алксниса (1973), доцент, доктор технических наук, действительный член Академии навигации и управления движением, главный научный сотрудник ООО «Экспериментальная мастерская «НаукаСофт», профессор филиала «Стрела» МАИ, автор более 120 научных работ, область научных интересов – оценивание состояния, идентификация и диагностика авиационного оборудования.