

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕГРАЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ БИНС-1000 НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

Ю. Н. Коркишко¹, В. А. Федоров², А. П. Патрикеев³
ООО НПК "ОПТОЛИНК", 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д.5
Тел. (+7-495) 536-9933, Факс (+7-495) 536-9934, e-mail: opto@optolink.ru

А. В. Чернодаров⁴, В. А. Матюшин⁵
Военно-воздушная инженерная академия им. П.Е. Жуковского,
125190, Россия, Москва, ул. Планетная, 3
Тел. (+7-499) 231-1118, e-mail: chernod@mail.ru

С. Е. Переляев⁶
Московский институт электромеханики и автоматики, 125319, Россия, Москва,
Авиационный переулок, 5, e-mail: aomic@aviapribor.ru

Аннотация

Ключевые слова: инерциально-спутниковые навигационные системы, волоконно-оптические гироскопы, объектно-ориентированная технология интеграции навигационных измерителей

Рассматриваются особенности реализации объектно-ориентированной технологии интеграции навигационных измерителей в бесплатформенных инерциально-спутниковых системах (БИНС). Представлена структура проблемно-ориентированного аппаратного и программно-математического обеспечения системы БИНС-1000 на базе волоконно-оптических гироскопов. Приводятся результаты стендовых и натурных испытаний системы БИНС-1000, подтверждающие возможность и целесообразность применения предлагаемой технологии для создания заказных БИНС различного назначения.

Введение

Развитие бортового оборудования летательных аппаратов (ЛА) характеризуется разработкой и внедрением интегрированных систем навигации (ИСН). Необходимость и целесообразность создания таких систем связана с ужесточением требований к навигационной безопасности полетов маневренных ЛА. Интеграция навигационных систем (НС) позволяет решать следующие задачи:

- обеспечение непрерывности и глобальности навигационных определений;
- обеспечение требуемых точностных характеристик, достоверности и целостности навигационных определений;
- объединение в единую структуру навигационных измерителей различного принципа действия и обеспечение на этой основе взаимной поддержки НС;
- реализация интеграционных возможностей оптимальных оценивающих фильтров;
- обеспечение взаимного контроля, парирования сбоев и отказов;
- обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик НС в изменяющейся помеховой обстановке;
- снижение времени готовности НС к применению и др.

Реализация потенциальных возможностей ИСН требует адекватной организации вычислительного процесса. Такая организация должна исключать фазовые искажения и обеспечивать требуемую частоту определения параметров движения ЛА.

В работе рассматривается объектно-ориентированная технология построения математического и аппаратного обеспечения ИСН. Такая технология предусматривает настройку аппаратной части на решаемую задачу и отображение алгоритмов ИСН на реконфигурируемую измерительно-вычислительную среду (ИВС). Реконфигурируемая ИВС позволяет выполнять обработку аппаратного и программно-математического обеспечения ИСН как при проведении стендовых, так и натурных экспериментов.

Цель работы – улучшение эксплуатационных характеристик ИСН на основе объектно-ориентированной технологии интеграции навигационных измерителей.

¹ Доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор.

² Доктор физико-математических наук, профессор, технический директор.

³ Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

⁴ Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник.

⁵ Преподаватель.

⁶ Доктор технических наук, главный научный сотрудник.

К эксплуатационным характеристикам ИСН, существенно влияющим на навигационную безопасность, можно отнести точность, надежность, целостность и время готовности ИСН к применению.

1. Объектно-ориентированная технология аппаратного обеспечения интегрированных бесплатформенных инерциально-спутниковых навигационных систем

В НИК "ОИГОЛИНК" (Зеленоград) объектно-ориентированная технология рассматривается как базовая при разработке интегрированных бесплатформенных инерциально-спутниковых навигационных систем (БИСНС) на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), в частности БИСНС-500 и БИСНС-1000.

На рис. 1 представлен опытный образец системы БИСНС-1000, на рис. 2 – ее структурная схема.

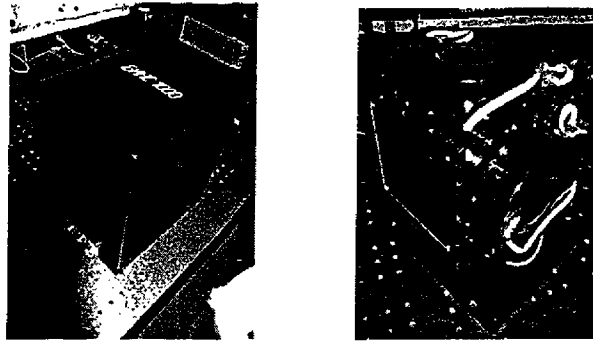


Рис. 1. Бесплатформенная инерциально-спутниковая навигационная система БИСНС-1000

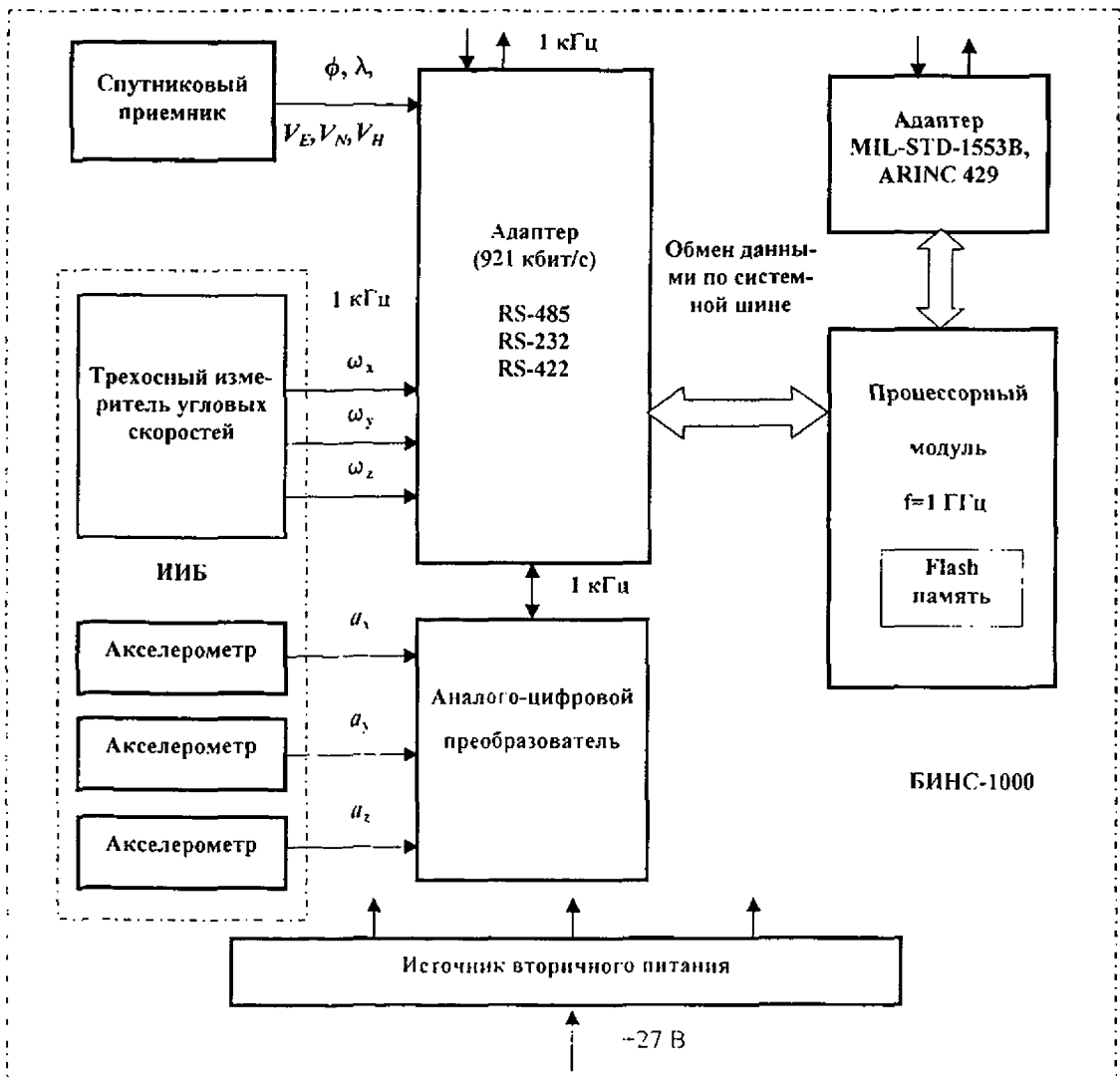


Рис. 2 Структурная схема бесплатформенной инерциально-спутниковой навигационной системы БИСНС-1000

В данных системах аппаратная настройка измерительно-вычислительной среды опирается на предварительную структуризацию алгоритмического обеспечения и направлена на решение следующих задач:

- возможность реализации на основе базовой архитектуры ИВС различных вариантов построения БИСНС в зависимости от назначения объекта, требуемых эксплуатационных характеристик и стоимости;
- последовательное расширение вычислительных возможностей ядра ИВС при сквозной реализации различных режимов функционирования БИСНС;
- обеспечение многоуровневой иерархической организации вычислительного процесса;
- минимизация аппаратных затрат на основе модульной интегрированной архитектуры построения ИВС;
- возможность реконфигурации и адаптации ИВС к режимам функционирования ИСНС и объекта на основе унификации программно-аппаратных модулей. При разработке серии БИСНС на ВОГ в качестве базового использован стандарт РС-104;
- возможность предварительной обработки информации с датчиков, преобразованной в цифровую форму;
- возможность адаптации интерфейсов ИВС к объекту;
- возможность реализации всех вычислительных процедур за один такт, задаваемый опорным генератором. Такая возможность может быть достигнута на основе следующих технологических решений:
 - потоковая RISC – организация вычислительного процесса;
 - буферизация и распараллеливание входной и выходной информации;
 - синхронизация процедур сбора, обработки и регистрации данных на всех уровнях иерархии;
 - использование системной шины ИВС для ускорения обмена данными между модулями БИСНС.

2. Объектно-ориентированная технология программно-математического обеспечения интегрированных беспилотных инерциально-спутниковых навигационных систем

Объектно-ориентированная технология программно-математического обеспечения (ПМО) предусматривает отображение алгоритмов ИСНС на реконфигурируемую измерительно-вычислительную среду.

Такая технология опирается на решение следующих задач:

- распределение задач сбора, обработки и регистрации данных между уровнями иерархии ИВС;
- структуризация алгоритмического обеспечения ИСНС с целью унификации программно-математических модулей и потоковой RISC-организации вычислений;
- отображение унифицированных программно-математических модулей на многоуровневую иерархическую структуру ИВС;
- согласование процедур первичной и вторичной обработки сигналов навигационных измерителей с вычислительными возможностями ИВС;
- повышение однородности вычислительного процесса на основе минимизации количества проверок и условий.

При разработке ПМО для системы БИСНС-1000 использованы следующие объектно-ориентированные технологические решения, которые опираются на сильносвязанные схемы демпфирования ошибок БИСНС [1]:

... однородность и потоковая реализация алгоритмов автономного функционирования БИСНС достигнута на основе раздельного решения кватернионных уравнений для параметров ориентации, навигации и их ошибок

$$\dot{q}_0 = \Pi_0 q_0; \quad (1)$$

$$\dot{q}_1 = \Pi_1 q_1; \quad (2)$$

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

где q_0 – кватернион, характеризующий угловую ориентацию связанной с инерциальным измерительным блоком (ИИБ) системы координат ox_0z_0 относительно инерциальной $Ox_n Y_n Z_n$ [2]; q_1 – кватернион, характеризующий угловую ориентацию свободного в азимуте опорного навигационного трехгранника $o\xi_1 \eta_1 \zeta_1$ относительно земной геоцентрической системы координат $Ox_3 Y_3 Z_3$ [2, 3];

$$\Pi_0 = \begin{bmatrix} 0 & \dot{\Theta}_y & -\dot{\Theta}_x & -\dot{\Theta}_z \\ -\dot{\Theta}_y & 0 & \dot{\Theta}_z & -\dot{\Theta}_x \\ \dot{\Theta}_x & -\dot{\Theta}_z & 0 & -\dot{\Theta}_y \\ \dot{\Theta}_z & \dot{\Theta}_x & \dot{\Theta}_y & 0 \end{bmatrix}; \quad \Pi_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_\xi & -\omega_\eta & -\omega_\zeta \\ \omega_\xi & 0 & \omega_\zeta & -\omega_\eta \\ \omega_\eta & -\omega_\zeta & 0 & \omega_\xi \\ \omega_\zeta & \omega_\eta & -\omega_\xi & 0 \end{bmatrix}$$

где $\dot{\Theta} = [\dot{\Theta}_x \quad \dot{\Theta}_y \quad \dot{\Theta}_z]^T$ – вектор выходных сигналов ВОГ; $\bar{\omega} = [\omega_\xi \quad \omega_\eta \quad \omega_\zeta]^T$ – вектор угловых скоростей вращения опорного трехгранника $o\xi\eta\zeta$ в геодезической системе координат [4]. Причем для свободного в азимуте трехгранника $\omega_\zeta = 0$. Элементы вектора $\bar{\omega}$ определяются по проекциям V_ξ, V_η, V_ζ вектора относительной скорости \dot{V} из решения основного уравнения инерциальной навигации

$$\dot{V} = C_2^T \bar{a} + \bar{g} - 2\bar{\Omega} \times \bar{V} - \bar{\omega} \times \bar{V} - \bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times \bar{R}), \quad (4)$$

где $\bar{V} = [V_\xi \quad V_\eta \quad V_\zeta]^T$ – вектор относительной скорости движения ИИБ в проекциях на оси опорного навигационного трехгранника $o\xi\eta\zeta$; $\bar{a} = [a_x \quad a_y \quad a_z]^T$ – вектор выходных сигналов акселерометров; $\bar{g} = [g_\xi \quad g_\eta \quad g_\zeta]^T$ – вектор гравитационного ускорения; $\bar{\Omega} = [\Omega_\xi \quad \Omega_\eta \quad \Omega_\zeta]^T$ – вектор угловой скорости вращения Земли; $\bar{R} = [0 \quad 0 \quad R]^T$ – радиус-вектор местоположения ИИБ; (\times) – оператор векторного произведения; C_2 – матрица направляющих косинусов, характеризующая угловую ориентацию связанной системы координат $oxyz$ относительно опорного трехгранника $o\xi\eta\zeta$ и определяемая по элементам кватернионов q_0, q_1 и углу $\Omega \Delta t$, где Δt – время функционирования БИНС. Кроме того, по элементам данных кватернионов определяются углы ориентации ψ, ϑ, γ ИИБ относительно сопровождающего трехгранника $oENI$ геодезической системы координат, а также геодезические широта φ и долгота λ ; $\Pi_0; \Pi_1$ – кососимметричные матрицы, знаки элементов которых соответствуют конструктивному исполнению ИИБ; $x(t)$ – вектор ошибок БИНС. Раздельное решение уравнений (1),(2) позволило довести глубину оценивания ошибок БИНС до уровня чувствительных элементов (ЧЭ): гироскопов и акселерометров. Базовый вектор $x(t)$ включал 17 параметров, а именно: ошибки счисления составляющих вектора относительной скорости $\Delta V_\xi, \Delta V_\eta, \Delta V_\zeta$, ошибки счисления элементов кватернионов Δq_0 и Δq_1 , угловые дрейфы ВОГ $\Delta \dot{\Theta}_x, \Delta \dot{\Theta}_y, \Delta \dot{\Theta}_z$ и смещения акселерометров $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$. Уравнения ошибок ЧЭ формировались в системе координат, связанной с ИИБ. Это позволило реализовать сильно-связанную схему демпфирования ошибок ЧЭ с фильтром Калмана в контуре оценивания; $A(t) = \frac{\partial F(Y,t)}{\partial Y}$ – матрица частных производных; $F(Y,t)$ – функция, представляющая в общем виде правые части уравнений БИНС (1), (2), (4) и ошибок ЧЭ; $Y = Y(t)$ – вектор параметров, определяемых БИНС; $G(t)$ – матрица интенсивностей возмущений $\xi(t)$; однородность и потоковая реализация алгоритмов комплексирования БИНС и спутниковой навигационной системы (СПС) достигнута на основе H - D технологии [5] обработки наблюдений.

Процедуры такой обработки опираются на вычислительно устойчивую U – D модификацию фильтра Калмана – Джозефа [6] и вытекают из тождества

$$P_{i,j} - W_{i,j} \bar{D}_{i,j} W_{i,j}^T = U_{i,j} D_{i,j} U_{i,j}^T, \quad (5)$$

где $P_{i,j}$ – значение апостериорной ковариационной матрицы ошибок оценивания на i -м шаге после обработки j -го элемента вектора наблюдений Z_i ; $W_{i,j}$ – прямоугольная матрица размерности $n \times (n+j)$; $\bar{D}_{i,j}$ – диагональная матрица размерности $(n+j) \times (n+j)$; $U_{i,j}$ – верхняя треугольная матрица размерности $n \times n$ с единичными диагональными элементами; $D_{i,j}$ – диагональная матрица размерности $n \times n$.

На основе тождества (5) реализована W – D модификация алгоритма адаптивно-робастной обработки наблюдений

Прогноз:

$$m_0 = \hat{x}_{i/l, -1} = \Phi_i \hat{x}_{i-1/l, -1}; \quad (6)$$

$$W_0 = [\Phi_i U_{i-1/l, -1} : \Gamma_i]; \quad (7)$$

$$\bar{D}_0 = \text{diag}(D_{i-1/l, -1}, Q_{i-1}); \quad (8)$$

Настройка:

$$v_j = z_j - H_j m_{j-1}; \quad \beta_j = v_j / \alpha_j; \quad (9)$$

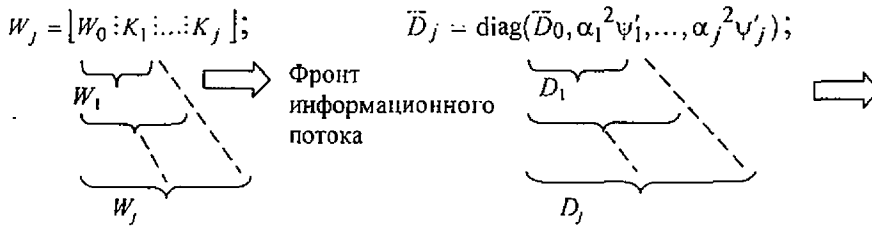
$$\psi_j = \psi(\beta_j); \quad \psi'_j = \psi'(\beta_j); \quad (10)$$

Коррекция:

$$f_j = H_j W_{j-1}; \quad V_j = D_{j-1} f_j^T; \quad (11)$$

$$\tilde{\alpha}_j = f_j V_j \psi'_j + \alpha_j^2; \quad K_j = W_{j-1} V_j / \tilde{\alpha}_j; \quad (12)$$

$$m_j = m_{j-1} + K_j \alpha_j \psi_j; \quad \hat{x}_{i/l, j} = m_j; j = \bar{1}, l; \quad (13)$$



Ортогональное преобразование:

$$MWGS\{W_l; \bar{D}_l\} \rightarrow U_{ll}; D_{ll}, \quad (15)$$

где $m_j, \hat{x}_{i/l, j}$ – оценки вектора ошибок БИНС на i -м шаге после обработки соответственно j -го элемента z_j и всего вектора наблюдений z_i ; α_j – параметр масштаба; Φ_i, Γ_i – переходные матрицы для векторов состояния x_i и возмущений ξ_i соответственно; Q_i – ковариационная матрица для вектора возмущений; ψ_j, ψ'_j – функция влияния и ее производная [6], устанавливающие уровень доверия к поступающим наблюдениям. Данные функции формируются с учетом априорных предположений о законах распределений полезного сигнала и помехи или настраиваются адаптивно [7]; MWGS – процедура [8] преобразования совокупности матриц W_l размерности $n \times (n+l)$ и \bar{D}_l размерности $(n+l) \times (n+l)$ в совокупность матриц U_{ll}, D_{ll} размерности $n \times n$.

Потоковая организация вычислений позволила вынести процедуру ортогонализации (15) из базового цикла обработки наблюдений (9) – (14) и выполнять её однократно.

Алгоритм (6) – (15) реализован на уровне первичной и вторичной обработки сигналов. Его место в структуре ПМО системы БИНС-1000 показано на рис. 3, где Акс – триада акселерометров; ДУС – триада датчиков угловой скорости; ПФ – цифровой фильтр; ПК – преобразователь координат; \hat{x}_{Σ} – вектор оценок смещений сигналов акселерометров; $\hat{x}_{\Sigma 0}$ – вектор оценок дрейфов ВОГ; РФК – робастная W/D модификация фильтра Калмана.

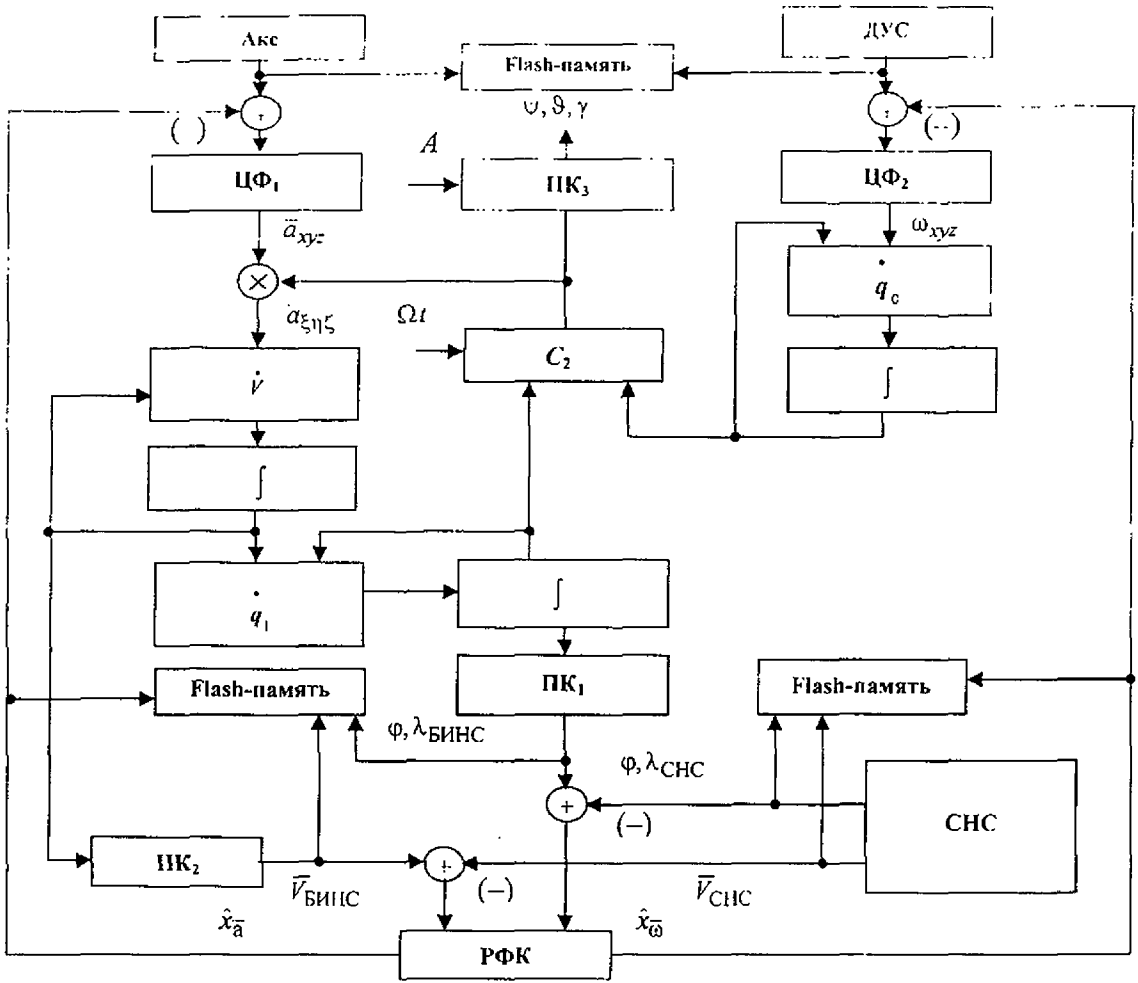


Рис. 3. Структурная схема программного-математического обеспечения системы БИНС-1000

3. Анализ результатов исследований

Объектом экспериментальных исследований являлась интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система БИНС-1000 на базе ВОГ ОИУС-1000 разработки НПК "ОПТОЛИНК" (Зеленоград) [9] и спутникового приемника К-161 разработки РИРВ (Санкт-Петербург).

Эксперименты проводились в наземных условиях с размещением оборудования на стенде и в подвижной лаборатории. Циклограмма работы БИНС включала следующие этапы: грубая начальная выставка (0÷100 с); точная начальная выставка (100÷600 с); навигационный режим (600÷7500 с). На этапе грубой начальной выставки выполнялось приближенное определение угловой ориентации инерциального измерительного блока по выходным сигналам чувствительных элементов. На этапе точной начальной выставки оценивались и компенсировались ошибки угловой ориентации и дрейфы ЧЭ ИИБ путем последовательной обработки сигналов наблюдений z_i следующего вида

$$z_{\Theta(i)} = C_{0(i)}^T \int_{t_{i-1}}^{t_i} \dot{\Theta}(\tau) d\tau - [0; 0; \Omega \Delta t_i]^T; \quad (16)$$

$$z_{k(i)} = [\varphi_i \lambda_i]_{\text{БИНС}}^T - [\varphi_i \lambda_i]_{\text{ТНВ}}^T; \quad (17)$$

$$z_{v(i)} = [V_{\xi} V_{\eta} V_{\zeta}]_{(i)\text{БИНС}}^T; \quad (18)$$

где ТНВ – обозначение точки начальной выставки; φ_i, λ_i – геодезические широта и долгота местоположения БИНС; $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ – шаг наблюдения.

Оценивание и компенсация ошибок БИНС в навигационном режиме выполнялось по позиционным и скоростным наблюдениям

$$z_{k(i)} = [\varphi_i \lambda_i]_{\text{БИНС}}^T - [\varphi_i \lambda_i]_{\text{СНС}}^T; \quad (19)$$

$$z_{v(i)} = C_{3(i)}^T [V_\xi V_\eta V_\zeta]_{(i)\text{БИНС}}^T - [V_E V_N V_H]_{(i)\text{СНС}}^T, \quad (20)$$

где C_3 – матрица направляющих косинусов, характеризующая взаимную угловую ориентацию трехгранников $o\xi\eta\zeta$ и $oENH$.

Результаты сравнительного анализа функционирования БИНС с различными схемами демпфирования ошибок ЧЭ получены на основе числения параметров движения по зарегистрированным сигналам ЧЭ ИИБ и СНС.

Некоторые результаты стендового эксперимента по оценке точностных характеристик системы БИНС-1000 представлены на рис. 4-7. На рис. 4 показаны: выходной сигнал (график светлого цвета, угл. с/с) «вертикального» гироскопа; сглаженный с помощью робастного цифрового фильтра [10] сигнал (график темного цвета) того же гироскопа. На рис. 5 показаны: выходной сигнал (график светлого цвета, м/с²) одного из горизонтальных акселерометров; сглаженный с помощью робастного цифрового фильтра сигнал (график темного цвета) того же акселерометра. Сглаживание выполнялось с частотой сема сигналов ЧЭ 1 кГц.

На рис. 6 показан реальный инструментальный дрейф ВОГ (град/ч), определяемый как среднее значение смещения “нуля” на временных интервалах в 10с и его оценка, полученная при обработке наблюдений (16) – (18) с частотой 1 Гц в процессе точной начальной выставки (100 ÷ 600с) и прогнозирования в режиме навигации по алгоритму (6). На рис. 7 показана оценка смещения акселерометра. С 600с БИНС-1000 функционировала в автономном инерциальном режиме. На рис. 8-11 показаны ошибки числения путевой скорости ΔV и круговой ошибки местоположения объекта ΔS . Рис. 8 отражает динамику изменения ошибки путевой скорости при демпфировании дрейфов ЧЭ, а рис. 9 – без демпфирования. Рис. 10 отражает динамику изменения круговой ошибки оценки местоположения объекта при демпфировании дрейфов ЧЭ, а рис. 11 – без демпфирования.

Рис. 12-17 отражают некоторые результаты экспериментов в подвижной лаборатории. На рис. 12-14 показаны соответственно углы истинного курса, тангажа и крена ИИБ, на рис. 15 – путевая скорость при движении испытательной лаборатории в городских условиях. Циклограмма работы БИНС-1000 в динамическом режиме: грубая начальная выставка (0 ÷ 10 с); точная начальная выставка (10 ÷ 15 с; алгоритм (16) ÷ (18)); навигация (15 ÷ 220 с; алгоритм (19), (20)). На рис. 16 показана ошибка оценки путевой скорости ΔV (м/с²); а на рис. 17 – круговая ошибка оценки местоположения объекта ΔS , где

$$\Delta S = \sqrt{\delta_\varphi^2 + \delta_\lambda^2}; \quad \Delta V = \sqrt{\Delta V_E^2 + \Delta V_N^2}; \quad \delta_\varphi = (\varphi_{\text{БИНС}} - \varphi_{\text{СНС}})R; \quad \delta_\lambda = (\lambda_{\text{БИНС}} - \lambda_{\text{СНС}})R;$$

$$R = a(1 - 0,5e^2 \sin^2 \phi); \quad a = 6378245 \text{ м}; \quad e^2 = 0,0066934;$$

$$\Delta V_E = V_{E(\text{БИНС})} - V_{E(\text{СНС})}; \quad \Delta V_N = V_{N(\text{БИНС})} - V_{N(\text{СНС})};$$

$$V_{E(\text{БИНС})} = V_\xi \cos A - V_\eta \sin A; \quad V_{N(\text{БИНС})} = V_\xi \sin A + V_\eta \cos A;$$

A – азимутальный угол опорного трехгранника $o\xi\eta\zeta$ относительно сопровождающего $oENH$.

$\dot{\theta}$, $\hat{\theta}$, угл. с/с

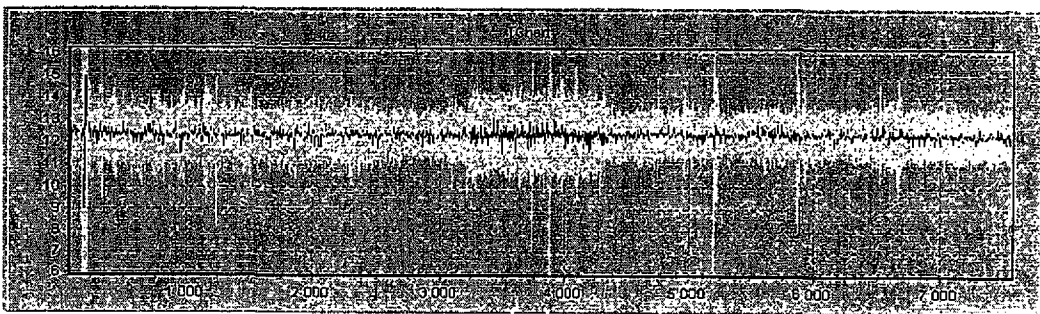


Рис. 4. Выходной сигнал «вертикального» гироскопа

t, c

$a_x, \text{м/с}^2$

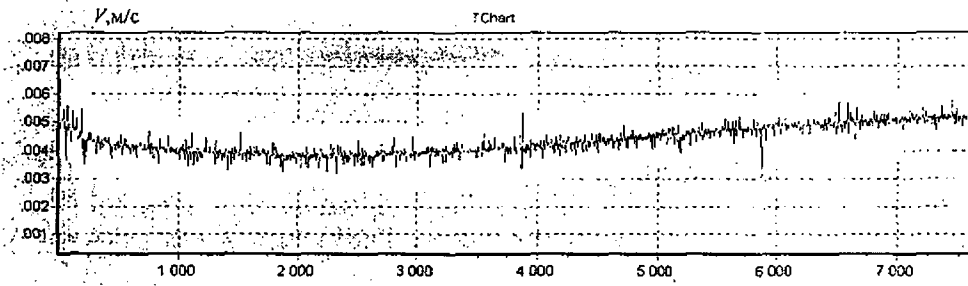


Рис. 5. Выходной сигнал одного из горизонтальных акселерометров

$t, \text{с}$

$\Delta\omega_z, \text{°/ч}$

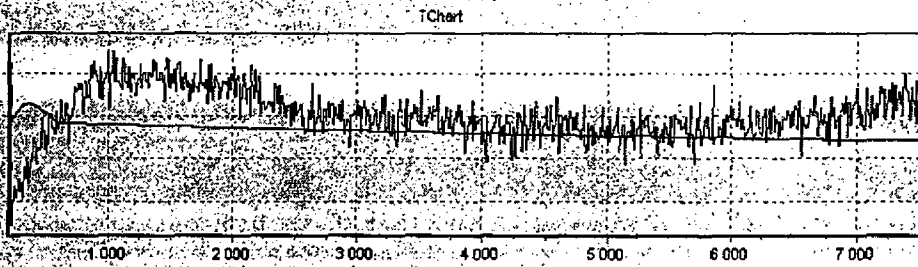


Рис. 6. Реальный инструментальный дрейф ВОГ и его оценка

$t, \text{с}$

$\Delta a_x, \text{м/с}^2$

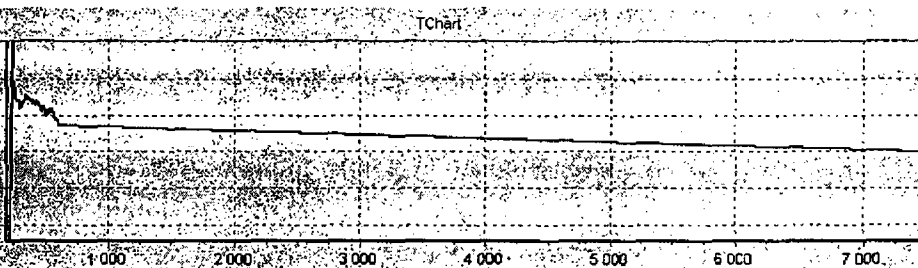


Рис. 7. Оценка смещения акселерометра

$t, \text{с}$

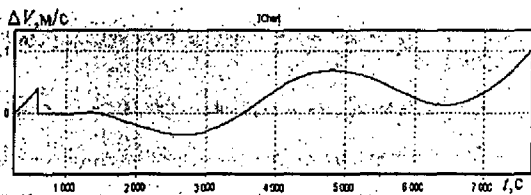


Рис. 8. Динамика изменения ошибки путевой скорости при демпфировании дрейфов ЧЭ

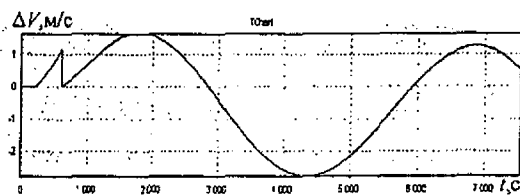


Рис. 9. Динамика изменения ошибки путевой скорости без демпфирования дрейфов ЧЭ

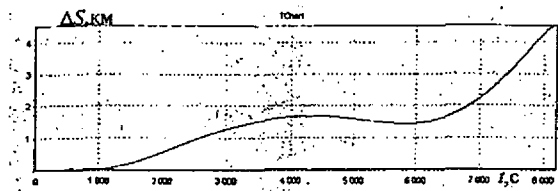


Рис. 10. Динамика изменения круговой ошибки оценки местоположения объекта при демпфировании дрейфов ЧО

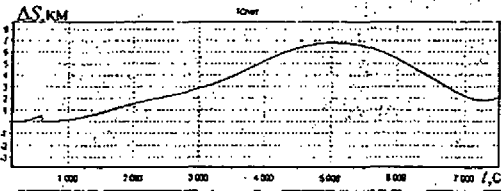


Рис. 11. Динамика изменения круговой ошибки оценки местоположения объекта без демпфирования дрейфов ЧО

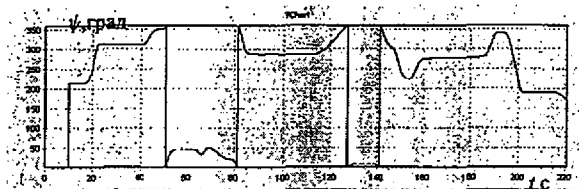


Рис. 12. Угол истинного курса

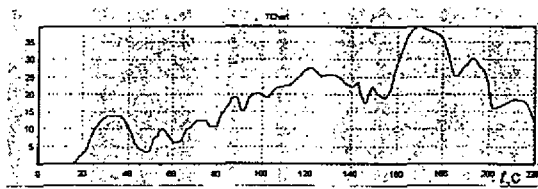


Рис. 15. Путьевая скорость

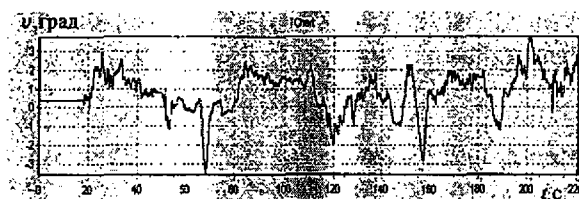


Рис. 13. Угол тангажа

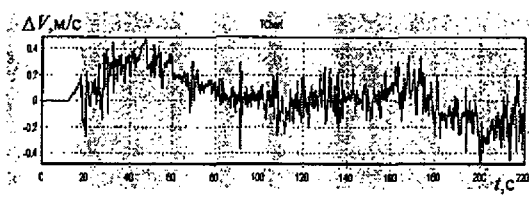


Рис. 16. Ошибка оценки путьевой скорости

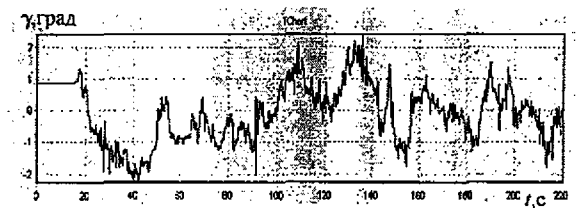


Рис. 14. Угол крена

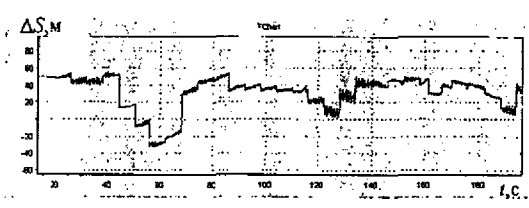


Рис. 17. Круговая ошибка оценки местоположения объекта

Проведенные исследования подтверждают эффективность применения объектно-ориентированной технологии для создания заказных БИНС.

Заключение

В представленной работе рассматривается объектно-ориентированная технология интеграции навигационных измерителей. Такая технология тесно связана с системными подходами к проектированию бортового оборудования различного назначения по критерию эффективность-стоимость. Показано ее применение при создании бесплатформенной инерциально-спутниковой навигационной системы БИНС-1000 на волоконно-оптических гироскопах. Системное проектирование программно-математического и аппаратного обеспечения (ПМАО) БИНС-1000 выполнялось, начиная с наиболее ресурсоемкой в вычислительном отношении задачи – комплексирование навигационных измерителей на всех уровнях иерархии. В этом случае представляется возможным сохранять структуру ПМАО при применении различных параметров ориентации и навигации, а также - при коррекции математических моделей чувствительных элементов.

Литература

1. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Гладкин С.М., Булгаков С.Л., Михеенков Ю.П., Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю. Улучшение эксплуатационных характеристик интегрированных навигационных систем на основе взаимосвязанных схем демпфирования ошибок чувствительных элементов // Материалы 13 Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2006, с. 111 - 120.
2. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 52 с.
3. Бромберг П.В. Теория инерциальных систем навигации. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1979. – 296 с.
4. ГОСТ Р 51794 - 2001. Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. – М.: Госстандарт России, 2001. – 12 с
5. Чернодаров А.В., Коврегин В.Н., Рогалев А.П., Алакоз Г.М. Адаптивно-робастная обработка сигналов на однородных вычислительных структурах. – В кн.: Методы и микроэлектронные средства цифрового преобразования и обработки сигналов. – Рига: ИЭВТ АН ЛССР, 1989, т.1, с. 357-359.
6. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Будкин В.Л., Голиков В.П., Ларионов С.В. Летная отработка бортовых оценивающих фильтров // Материалы 11 Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004, с. 19 - 28.
7. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Платонов А.Ю. и др. Параметрическая идентификация моделей погрешностей интегрированных систем навигации в режиме реального времени и по данным бортовых устройств регистрации // Гироскопия и навигация, 2007, № 4(30), с. 17–31.
8. Bierman G.J. Factorization methods for discrete sequential estimation. – N.Y.: Academic Press, 1977. – 320p.
9. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Марчук В.Г., Морев И.В., Кострицкий С.М., Падерин Е.М., Несенюк Л.П., Буравлев А.С., Лисин Л.Г. Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности // Материалы 14 Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2007, с. 141-150.
10. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Чернодаров А.В., Патрикеев, Переляев С.Е. Многоуровневая обработка сигналов волоконно-оптических гироскопов в бесплатформенных инерциальных навигационных системах // Материалы 15 Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2008, с.54 -56.
11. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.