

## ПОЛУНАТУРНАЯ ОТРАБОТКА МНОГОПОЗИЦИОННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ \*

А. В. Чернодаров<sup>1</sup>, А. П. Патрикеев<sup>2</sup>

ООО «Экспериментальная мастерская «НаукаСофт», Москва, Россия, e-mail: chernod@mail.ru

А. Б. Борзов<sup>3</sup>, И. И. Меркулова<sup>4</sup>

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия,  
e-mail: borzov@ Rambler.ru

Ю. Н. Коркишко<sup>5</sup>, В. А. Федоров<sup>6</sup>, И.В. Федоров<sup>7</sup>

ООО НПК «ОПТОЛИНК», Москва, Зеленоград, e-mail: opto@optolink.ru

### Аннотация

**Ключевые слова:** инерциальные навигационные системы, многопозиционные измерения, волоконно-оптические датчики, микромеханические датчики, мажоритарный контроль.

*Рассматриваются особенности построения и применения многопозиционных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (МБИНС) на базе измерителей различного принципа действия. Обосновываются новые свойства МБИНС, связанные с объединением их в единую структуру. Показывается возможность повышения их точностных и надежностных характеристик. Предлагаемые подходы к реализации такой возможности МБИНС опираются на мажоритарные схемы стохастического контроля и оптимизацию структуры распределенных измерителей.*

### Контроль и оптимизация структуры многопозиционных БИНС

Современное состояние бортовых измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) характеризуется включением в их состав многопозиционных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (МБИНС). Это связано с необходимостью навигационного обеспечения не только летательных аппаратов (ЛА), но и бортовых систем обзора земной поверхности, в состав которых включаются БИНС. К таким системам относятся радиолокационные (РЛС), видеоконтрольные (ВКУ), лазерные сканирующие (лидары) и другие обзорные устройства. В то же время при объединении МБИНС в единую структуру появляются новые функциональные возможности таких комплексных навигационных систем, а именно: резервирование и взаимная поддержка БИНС и повышение на этой основе информационной надежности ИВК; взаимный контроль и диагностирование БИНС; оптимизация структуры МБИНС для обеспечения требуемой точности навигации и ориентации в сложных условиях эксплуатации ЛА. Такие условия связаны с маневрированием ЛА, потерей сигналов спутниковых навигационных систем (СНС).

Из-за ограничений на размеры и массу БИНС обзорных систем строятся на базе микромеханических (МЭМС) датчиков. Такие датчики имеют большую зону нечувствительности и невысокую точность. С учетом указанных особенностей БИНС-МЭМС должны опираться на базовую высокоточную БИНС, входящую в состав навигационного комплекса ЛА. Кроме того, БИНС-МЭМС не могут автономно заполнить начальную выставку по углам ориентации. Поэтому начальная выставка таких БИНС реализуется по информации от базовой системы.

Указанные особенности были учтены в МБИНС совместной разработки ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт» (Москва) и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Макетный образец МБИНС представлен на рис. 1, где показаны: БИНС-500НС – бесплатформенная инерциально-спутниковая навигационная система на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) совместной разработки «ЭМНС НаукаСофт» и НПК «Оптолинк» (Зеленоград); микромеханические БИНС - МЭМС, построенные на базе измерительных модулей ADIS16488 компании Analog Devices. Рассматриваемые в работе технологические решения реализованы на базе Ethernet и операционной системы реального времени Linux, поддерживающей модульную архитектуру построения МБИНС.

Цель работы – исследование возможностей ИВК при объединении МБИНС в тесно связанную информационно-измерительную структуру.

<sup>1</sup> Доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник.

<sup>2</sup> Кандидат технических наук, заместитель генерального директора.

<sup>3</sup> Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой.

<sup>4</sup> Аспирант.

<sup>5</sup> Доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор

<sup>6</sup> Доктор физико-математических наук, профессор, технический директор.

<sup>7</sup> Кандидат технических наук, начальник лаборатории.

В блоке обработки информации МБИНС реализовано программно-математическое обеспечение (ПМО), расширяющее потенциальные возможности отдельных модулей, а именно: стохастический мажоритарный контроль, а также выбор наиболее предпочтительной системы из резервированного множества. Мажоритарная схема диагностирования может быть рассмотрена на примере взаимодействия трех идентичных БИНС: БИНС<sub>1</sub>, БИНС<sub>2</sub>, БИНС<sub>3</sub>, представленных на рис. 2, где обозначены:  $Y_i$  - вектор параметров движения ЛА;  $z_{p_1(i)}$ ;  $z_{p_2(i)}$ ;  $z_{p_3(i)}$  - векторы параметров, формируемых БИНС;  $z_i$  - векторы параметров, измеренных внешней по отношению к БИНС-МЭМС системой, например, СНС или БИНС-ВОГ;  $\Delta z_{1(i)}$ ;  $\Delta z_{2(i)}$ ;  $\Delta z_{3(i)}$  - векторы наблюдений;  $\hat{x}_{i/i(k)}$  - вектор оценок ошибок  $x_{i(k)}$   $k$ -й БИНС, сформированный после обработки наблюдений в  $i$ -й момент времени,  $k = \overline{1,3}$ ;  $U_{i/i(j)}$  - верхняя треугольная матрица с единичной диагональю и  $D_{i/i(j)}$  диагональная матрица, которые являются компонентами следующих ковариационных матриц ошибок оценивания:  $P_{i/i(k)} = U_{i/i(k)} D_{i/i(k)} U_{i/i(k)}^T = M[\delta_{i/i(k)} \delta_{i/i(k)}^T]$ ;  $\delta_{i/i(k)} = x_{i(k)} - \hat{x}_{i/i(k)}$ ;  $x_{i(k)}$  - вектор действительных ошибок  $k$ -й БИНС в  $i$ -й момент времени.

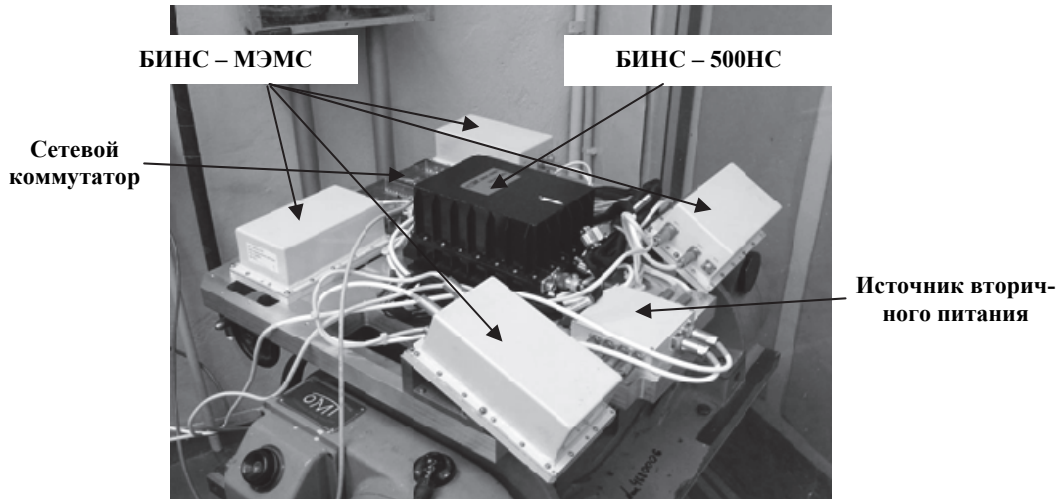


Рис. 1. Многопозиционная резервированная БИНС

Наиболее предпочтительная система из резервированного множества может быть выбрана на основе анализа следующих диагностических параметров

$$J_{1,2} = \Delta v_{1,2}^T \Delta P_{1,2}^{-1} \Delta v_{1,2}; \quad J_{1,3} = \Delta v_{1,3}^T \Delta P_{1,3}^{-1} \Delta v_{1,3}; \quad J_{2,3} = \Delta v_{2,3}^T \Delta P_{2,3}^{-1} \Delta v_{2,3}, \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta v_{1,2} = \hat{x}_{i/i(1)} - \hat{x}_{i/i(2)}; \quad \Delta v_{1,3} = \hat{x}_{i/i(1)} - \hat{x}_{i/i(3)}; \quad \Delta v_{2,3} = \hat{x}_{i/i(2)} - \hat{x}_{i/i(3)}; \quad (2)$$

$$\Delta P_{1,2} = P_{i/i(1)} + P_{i/i(2)}; \quad \Delta P_{1,3} = P_{i/i(1)} + P_{i/i(3)}; \quad \Delta P_{2,3} = P_{i/i(2)} + P_{i/i(3)}. \quad (3)$$

Соотношения (1) – (3) сформированы с учетом  $M[\delta_1 \delta_2^T] = 0$ ;  $M[\delta_1 \delta_3^T] = 0$ ;  $M[\delta_2 \delta_3^T] = 0$ ;

$$\delta_1 = x_i - \hat{x}_{i/i(1)}; \quad \delta_2 = x_i - \hat{x}_{i/i(2)}; \quad \delta_3 = x_i - \hat{x}_{i/i(3)}.$$

В соотношениях (1)–(3) проблемной является задача вычисления обратных матриц  $\Delta P_{1,2}^{-1}$ ;  $\Delta P_{1,3}^{-1}$ ;  $\Delta P_{2,3}^{-1}$ . Такая задача может быть решена при реализации алгоритмов обработки наблюдений на основе  $U$ - $D$  модификации [1] обобщенного фильтра Калмана (ОФК)

$$\Delta P_{1,2}^{-1} = [U_{i/i(1)} \quad D_{i/i(1)} \quad U_{i/i(1)}^T + U_{i/i(2)} \quad D_{i/i(2)} \quad U_{i/i(2)}^T]^{-1} = [P_{i/i(1)} + \sum_{j=1}^n U_{j(2)} \quad U_{j(2)}^T / D_{j(2)}]^{-1}. \quad (4)$$

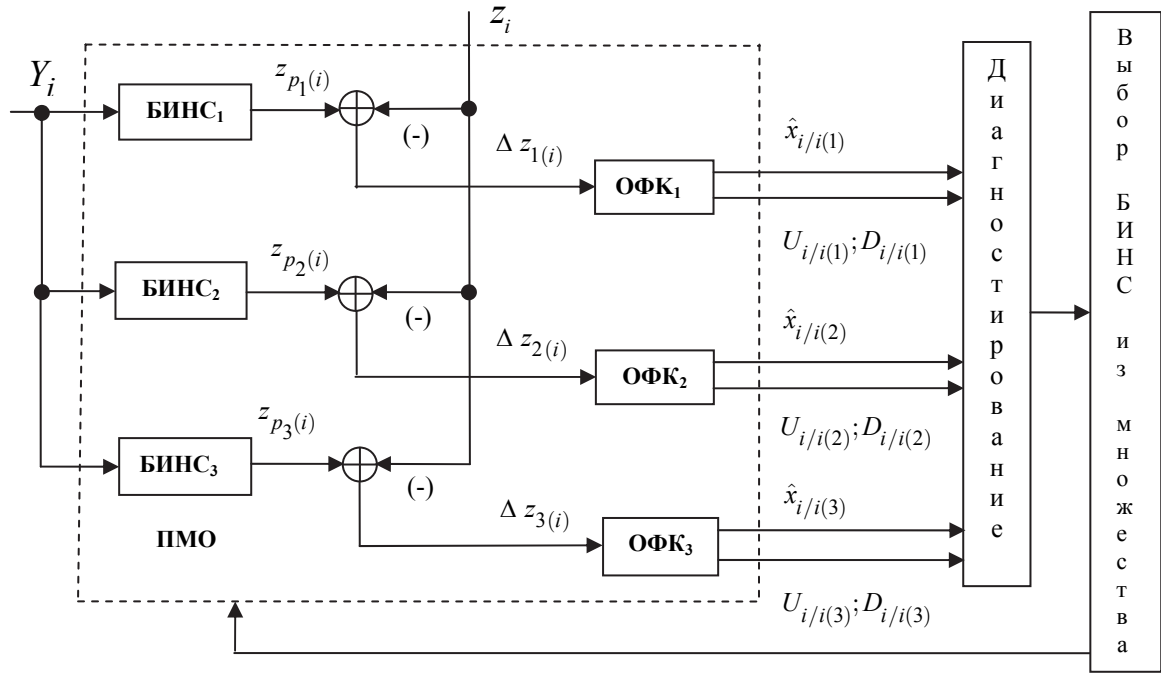


Рис. 2. Мажоритарная схема диагностирования многопозиционной БИНС

$$P_{i/i(1)} = U_{i/i(1)} D_{i/i(1)} U_{i/i(1)}^T = M_0; \quad U_{j(2)} - j\text{-й столбец матрицы } U_{i/i(2)}; \quad D_{j(2)} - j\text{-й элемент } D_{i/i(2)}$$

Используя лемму об обращении матрицы [1] и соотношение (4), можно сформировать рекуррентную процедуру реализации формулы (4) и вычисления матрицы  $\Delta P_{1,2}^{-1}$ :

$$M_i^{-1} = M_{i-1}^{-1} - M_{i-1}^{-1} U_{i(2)} / [U_{i(2)}^T M_{i-1}^{-1} U_{i(2)} + D_{i(2)}^{-1}]; \quad \Delta P_{1,2}^{-1} = M_n^{-1}; \quad j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Матрицы  $\Delta P_{1,3}^{-1}$  and  $\Delta P_{2,3}^{-1}$  также вычисляются по рекуррентной формуле (5). Можно показать [1], что при отсутствии нарушений в МБИНС квадратичные формы  $J_{kj}$  должны иметь распределение  $\chi^2$ , т.е.,  $J_{kj} \in \chi^2(n, 2n)$ . По аналогии с правилом  $3\sigma$  [1] для нормального закона и с учетом квантиля  $0.02(n)$  можно утверждать, что с доверительной вероятностью 0.98 необходимым условием принадлежности параметра  $J_{kj}$  к распределению  $\chi^2$  является следующее:

$$J_{kj} \leq \gamma_n^2 = n + 3\sqrt{2n}. \quad (6)$$

В модуле диагностирования на рис. 2 реализуются следующие процедуры контроля:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta J_{1,2} = J_{1,2} - \gamma_n^2 > 0 \\ \Delta J_{1,3} = J_{1,3} - \gamma_n^2 > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \text{Отказ}_{\text{БИНС}_1}; \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta J_{1,2} = J_{1,2} - \gamma_n^2 > 0 \\ \Delta J_{2,3} = J_{2,3} - \gamma_n^2 > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \text{Отказ}_{\text{БИНС}_2};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta J_{1,3} = J_{1,3} - \gamma_n^2 > 0 \\ \Delta J_{2,3} = J_{2,3} - \gamma_n^2 > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \text{Отказ}_{\text{БИНС}_3}$$

В работоспособной МБИНС наиболее предпочтительная БИНС из резервированного множества может быть выбрана на основе реализации следующих процедур:

$$\begin{aligned}
 (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{1,3}) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} < (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{2,3}) \\ < (\Delta J_{1,3} + \Delta J_{2,3}) \end{array} \right\} \rightarrow \text{Выбор} & \quad (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{2,3}) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} < (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{1,3}) \\ < (\Delta J_{1,3} + \Delta J_{2,3}) \end{array} \right\} \rightarrow \text{Выбор} \\
 \text{БИНС}_1 & \qquad \qquad \qquad \text{БИНС}_2 \\
 & \qquad \qquad \qquad ; \\
 (\Delta J_{1,3} + \Delta J_{2,3}) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} < (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{1,3}) \\ < (\Delta J_{1,2} + \Delta J_{2,3}) \end{array} \right\} \rightarrow \text{Выбор БИНС}_3.
 \end{aligned}$$

Если после локализации отказавшей БИНС требуется выполнить ее диагностирование, т. е. определить, с каким элементом вектора невязок  $\Delta v_{j,k}$  наиболее вероятно связано нарушение, то необходимо выполнить декомпозицию матрицы  $\Delta P_{j,k}^{-1}$  через ее  $\Delta U_{kj}^{-1}$ ,  $\Delta D_{kj}^{-1}$  компоненты. Для этого уравнение (5) можно представить в эквивалентном виде

$$M_j^{-1} = [K_j U_{j(2)}^T - E] M_{j-1}^{-1} [K_j U_{j(2)}^T - E]^T + K_j D_{j(2)}^{-1} K_j^T, \quad (7)$$

где  $K_j = M_{j-1}^{-1} U_{j(2)} / [U_{j(2)}^T M_{j-1}^{-1} U_{j(2)} + D_{j(2)}^{-1}]$ ;  $E$  – единичная матрица размерности  $n \times n$ .

Уравнение (7) записано в предположении, что отказавшей является БИНС<sub>1</sub>, а в качестве эталонной для диагностирования выбрана БИНС<sub>2</sub>. Выражение (7) может быть реализовано через  $U$ - $D$  процедуры [1]. Тогда

$$\Delta P_{1,2}^{-1} = \Delta U_{1,2}^{-T} \Delta D_{1,2}^{-1} \Delta U_{1,2}^{-1}, \text{ где } U_j^{-T} = (U_j^{-1})^T.$$

После формирования матриц  $\Delta U_{1,2}^{-1}$ ;  $\Delta D_{1,2}^{-1}$ , выполняется диагностирование ИНС<sub>1</sub> по следующему рекуррентному алгоритму, вытекающему из контрольного условия (6),

$$\Delta J_{1,2(j)} = \Delta J_{1,2(j-1)} + \Delta \tilde{v}_{1,2(j)}^2 \Delta D_{j-1}^{-1} > j + 3\sqrt{2j} \quad j = \overline{1, n}; \text{ при } \Delta J_{1,2(0)} = 0,$$

где  $\Delta \tilde{v}_{1,2} = \Delta U_i^{-1} \Delta v_{1,2}$ ;  $\Delta D_{j-1}^{-1} - j$  - й элемент диагональной матрицы  $\Delta D_{1,2}^{-1}$ ;  $\Delta \tilde{v}_{1,2(j)}^2 - j$  - й элемент вектора невязок.

Парирование нарушений в распределенной МБИНС выполняется путем реконфигурации и перераспределения функций отказавшей БИНС в блоке обработки информации.

### Анализ результатов исследований

Рассмотренная технология контроля, взаимной поддержки измерителей и оптимизации структуры МБИНС была апробирована в стендовом и летном экспериментах. Оценка и периодическая компенсация ошибок БИНС-МЭМС, в том числе, ошибок угловой ориентации и дрейфов чувствительных элементов выполнялась на основе метода векторного согласования и последовательной обработки с помощью  $U$ - $D$  фильтра сигналов наблюдений следующего вида:

$$\Delta z_V = [V_\xi V_\eta V_\zeta]^T_{\text{SINS-MEMS}} - [V_\xi V_\eta V_\zeta]^T_{\text{SINS-VOG}}; \Delta z_c = [\phi \lambda H]^T_{\text{SINS-MEMS}} - [\phi \lambda H]^T_{\text{SINS-VOG}},$$

где  $\phi, \lambda, H$  – геодезические широта, долгота и высота над земным эллипсоидом,числяемые БИНС;

$\bar{V} = [V_\xi V_\eta V_\zeta]^T$  - векторчисляемой относительной скорости в проекциях на оси полусвободного в азимуте опорного навигационного трехгранника  $o\xi\eta\zeta^*$ .

$\Delta S$ , км

$\Delta S$ , км

\* Черноваров, А.В. Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. – М.: Научтехлитиздат, 2017. – 300 с.

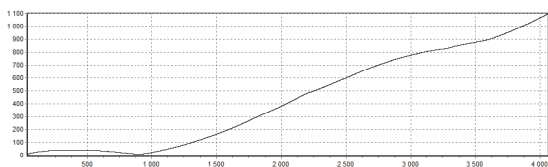


Рис. 3. Круговая позиционная ошибка без компенсации оценок параметров БИНС-МЭМС

*t, c*

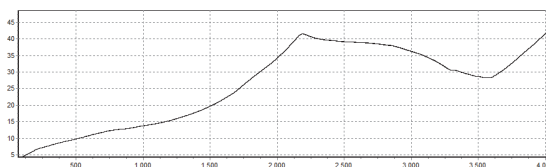


Рис.4. Круговая позиционная ошибка с при компенсацией оценок параметров БИНС-МЭМС

Характерные результаты совместной работы базовой и микромеханических БИНС представлены на рис. 3, 4, где показаны круговые позиционные ошибки  $\Delta S$ , соответствующие счислению параметров движения БИНС-МЭМС в автономном режиме и при взаимодействии с БИНС-ВОГ. Можно видеть, что без поддержки базовой системы точностные характеристики БИНС-МЭМС не обеспечиваются.