

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 629.7.054

ОБРАБОТКА ПОКАЗАНИЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА УНИФИЦИРОВАННОМ ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

В. П. Наумченко, П. А. Илюшин,
Д. Г. Пикунов, А. В. Соловьёв

Рассмотрены основы построения унифицированного программно-математического комплекса для обработки данных инерциальных приборов и систем, представлена его структура и детальное описание. Определено влияние инструментальных погрешностей инерциальных датчиков на точность решения задачи ориентации и навигации в автономном режиме и показана необходимость проведения калибровки датчиков. Приведена одна из возможных методик калибровки бесплатформенной инерциальной навигационной системы в различных ориентациях, методика обработки экспериментальных данных, а также результаты оптимизации параметров системы после калибровки. Разработанный на языке Python 3 комплекс применяется для обработки показаний приборов на базе волоконно-оптических, твердотельно-волновых и поплавковых гироскопов, а также вибрационно-струнных акселерометров. Его основное достоинство заключается в модульности, т. е. каждый элемент способен работать независимо от остальных. Представлены возможности комплекса на примере обработки результатов испытаний бесплатформенного измерительного блока, построенного на базе волоконно-оптических гироскопов и вибрационно-струнных акселерометров.

Ключевые слова: бесплатформенные инерциальные навигационные системы, инструментальные погрешности, калибровка, Python, унифицированный программно-математический комплекс.

Введение

Инерциальные навигационные системы (ИНС) – одни из основных средств навигации на большинстве подвижных объектов наземного, водного, воздушного, космического применения ввиду их значительных преимуществ по сравнению с другими навигационными системами [1, 2]:

- высокая информативность и универсальность (определение и выдача всей совокупности пилотажно-навигационных параметров, необходимых для управления подвижным объектом);

- полная автономность работы (за исключением ввода информации о начальных координатах подвижного объекта);

- высокая помехозащищенность [3, 4];

- возможность высокоскоростной выдачи информации (до 100 Гц и выше).

Одна из ключевых задач при создании ИНС – обеспечение их требуемой точности [5], которая зависит от инструментальных погрешностей гироскопов и акселерометров. Для идентификации погрешностей применяют калибровку, которая заключается в определении параметров математической модели ошибок с целью компенсации инструментальных погрешностей в режиме навигации [6].

Платформенные ИНС, благодаря конструктивным особенностям, способны проводить калибровку и начальную выставку самостоятельно, в то время как бесплатформенным (БИНС) необходимы специализированные поворотные столы (стенды). Существует большое разнообразие методов калибровки БИНС [7 – 14], основной критерий при выборе – минимизация погрешностей оцениваемых параметров. Количество измерительных положений выбирается исходя из полноты и объема

математической модели ошибок датчиков, а увеличение числа положений приводит к увеличению времени расчета оцениваемых параметров.

Для оперативной обработки данных, а также расчета точностных параметров по результатам испытаний был разработан унифицированный программно-математический комплекс (УПМК) на базе высокоуровневого языка программирования Python 3.

Цель работы – описание структуры УПМК на базе языка Python 3 для обработки результатов точностных испытаний инерциальных приборов. Приведены основные характеристики на основе первичных данных с гироскопов и акселерометров.

Актуальность, новизна и практическая значимость обусловлены возможностью применения УПМК для обработки первичных показаний ИНС по результатам точностных испытаний, что экономит время и ресурсы пользователя.

В ходе исследования использовались общенаучные (анализ, синтез, индукция, дедукция, аналогия) и специальные (логический, сравнительный, моделирование) методы.

Влияние инструментальных погрешностей инерциальных датчиков на точность бесплатформенных инерциальных навигационных систем

Погрешности приборов включают случайные и систематические составляющие.

Случайными погрешностями также называют шумы измерений. Поскольку в зависимости от области применения значения этих погрешностей меняются, то их поведение можно описать по моделям белого и цветного шума (марковский, фликкер-шум и др.) [15, 16]. Для анализа и определения

характеристик случайных процессов датчиков используют метод вариации Аллана [15]. С его помощью оценивают значения нестабильности нуля (Bias) и случайного блуждания угла/скорости (ARW/VRW) для каждого датчика.

К систематическим погрешностям инерциальных датчиков относят смещение нуля, отклонения действительных значений масштабных коэффициентов, неортогональность осей, а также несоосность триад акселерометров и гироскопов в составе ИНС относительно их номинальных значений [17].

Рассмотрим влияние систематических составляющих на точность БИНС в режиме навигации. Для экспресс-оценки ограничимся северным каналом (рис. 1).

Модель выходных сигналов БИНС с учетом погрешностей измерений имеет вид:

$$\begin{cases} n_x = (1 + \Delta k_a) [\dot{V}_{x1} \cos \vartheta + (g + \dot{V}_{y1}) \sin \vartheta + \Delta a_x], \\ n_y = (1 + \Delta k_a) [-\dot{V}_{x1} \sin \vartheta + (g + \dot{V}_{y1}) \cos \vartheta + \Delta a_y], \\ \omega_z = (1 + \Delta k_{gyro}) [-\dot{\varphi} + \dot{\vartheta} + \Delta \omega], \end{cases} \quad (1)$$

где n_x и n_y – кажущиеся ускорения, измеряемые акселерометрами; Δk_a и Δk_{gyro} – погрешности масштабных коэффициентов акселерометра и гироскопа; \dot{V}_{x1} и \dot{V}_{y1} – северная и вертикальная составляющие ускорения объекта в географической системе координат; ϑ – угол тангажа; g – ускорение свободного падения; Δa_x , Δa_y , $\Delta \omega$ – погрешности нулевого сигнала акселерометров и гироскопа (включают систематическую и случайную составляющие); ω_z – абсолютная угловая скорость объекта; $\dot{\varphi}$ и $\dot{\vartheta}$ – угловые скорости изменения широты и тангажа.

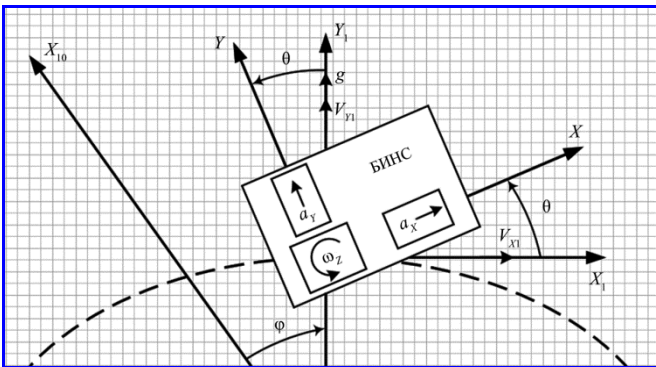


Рис. 1. Северный канал бесплатформенных инерциальных навигационных систем

Исследуем потенциальную величину ошибки навигации, вносимую систематическими погрешностями датчиков при работе в автономном режиме [17].

Приближенные формулы зависимости ошибок БИНС (по углу тангажа, линейной скорости и координаты) от нулевого сигнала гироскопа (датчика угловой скорости (ДУС)) имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta \vartheta_{gyro}} &\approx \sigma_{syst_{gyro}} t; & \sigma_{\Delta V_{gyro}} &\approx \frac{g \sigma_{syst_{gyro}} t^2}{2}; \\ \sigma_{\Delta X_{gyro}} &\approx \frac{g \sigma_{syst_{gyro}} t^3}{6}. \end{aligned} \quad (2)$$

При нулевом сигнале $5^\circ/\text{ч}$ за время автономной работы 5 мин получим:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta \vartheta_{gyro}} &\approx \frac{5}{3600} \cdot 360 = 0,5^\circ; \\ \sigma_{\Delta V_{gyro}} &\approx \frac{9,81 \cdot 5 / 3600 \cdot \pi / 180}{2} \cdot 360^2 = 15,4 \text{ м/с}; \\ \sigma_{\Delta X_{gyro}} &\approx \frac{9,81 \cdot 5 / 3600 \cdot \pi / 180}{6} \cdot 360^3 = 1849,1 \text{ м}. \end{aligned} \quad (3)$$

Приближенные формулы зависимости ошибок БИНС (по углу тангажа, линейной скорости и координаты) от нулевого сигнала акселерометра имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta \vartheta_{acc}} &\approx \sigma_{syst_{acc}} \frac{t^2}{2R}; \\ \sigma_{\Delta V_{acc}} &\approx \sigma_{syst_{acc}} t; \\ \sigma_{\Delta X_{acc}} &\approx \frac{\sigma_{syst_{acc}} t^2}{6}. \end{aligned} \quad (4)$$

При нулевом сигнале 10^{-3} м/с^2 за время автономной работы равной 5 мин получим:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta \vartheta_{acc}} &\approx 10^{-4} \frac{360^2}{2 \cdot 6400 \cdot 1000} = 1 \cdot 10^{-5}; \\ \sigma_{\Delta V_{acc}} &\approx 10^{-4} \cdot 360 = 0,36 \text{ м/с}; \\ \sigma_{\Delta X_{acc}} &\approx \frac{10^{-4} \cdot 360^2}{2} = 65 \text{ м}. \end{aligned} \quad (5)$$

По схожим формулам определяются погрешности БИНС при ошибках масштабного коэффициента. Например, при ошибке 0,01% за 5 мин будут накоплены следующие погрешности:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta\theta_{gyro}} &\approx 0,27^\circ; \quad \sigma_{\Delta V_{gyro}} \approx 4,2 \text{ м/с}; \\ \sigma_{\Delta X_{gyro}} &\approx 249,4 \text{ м}; \quad \sigma_{\Delta\theta_{acc}} \approx 0^\circ; \\ \sigma_{\Delta V_{acc}} &\approx 0,18 \text{ м/с}; \quad \sigma_{\Delta X_{acc}} \approx 16,2 \text{ м}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, необходимо проводить калибровку приборов для уменьшения погрешности в показаниях на уровень, соответствующий приведенным в формулах (3), (5) и (6) величинам.

Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем

Для калибровки БИНС используют специальные поворотные стенды. Наиболее распространены прямые методы калибровки [10, 12, 18 – 20], предполагающие определение углов неортогональности, нулевых сигналов и масштабных коэффициентов путем усреднения показаний при вращении стенда и в определенных статических положениях. Для расчета проводят серию замеров при различных ориентациях приборов. Например, для определения перегрузочных значений нулевых сигналов, масштабных коэффициентов и углов отклонения от номинальных положений одного гироскопического измерительного канала (ГИК) может потребоваться до 21 ориентации (табл. 1). Такое количество целесообразно, если математическая модель ошибок датчика строится исходя из предположения зависимости нулевого сигнала от влияния перегрузок или магнитных полей. При отсутствии системы термостабилизации температуры чувствительных элементов (ЧЭ) необходимы повторные циклы замеров при различной температуре окружающей среды/установочной поверхности для алгоритмической компенсации ее влияния на показания ЧЭ.

Модель выходных показаний датчиков имеет вид [21]:

$$\mathbf{U}_{\text{вых}} = S_{\omega} N_{\omega} \boldsymbol{\omega}_{\text{вх}} + \mathbf{B}_{\omega} + \boldsymbol{\xi}_{\omega}, \quad (7)$$

где $\mathbf{U}_{\text{вых}}$ – вектор измерений, поступающих по каждой измерительной оси датчиков; $S_{\omega} N_{\omega}$ – матрица, содержащая коэффициенты масштабирования и неортогональности осей; $\boldsymbol{\omega}_{\text{вх}}$ – вектор компонент истинных значений угловой скорости; \mathbf{B}_{ω} – вектор смещения нуля; $\boldsymbol{\xi}_{\omega}$ – вектор шумов измерений.

В свою очередь,

$$S_{\omega} N_{\omega} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xx} N_{xy} & S_{xx} N_{xz} \\ S_{yy} N_{yx} & S_{yy} & S_{yy} N_{yz} \\ S_{zz} N_{zx} & S_{zz} N_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где S_{xx}, S_{yy}, S_{zz} – масштабные коэффициенты по измерительным осям; $N_{xy}, N_{xz}, N_{yx}, N_{yz}, N_{zx}, N_{zy}$ – коэффициенты неортогональности осей.

Калибровочные показания датчиков $\boldsymbol{\omega}_{\text{отк}}$ вычисляются по выражению:

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{отк}} = (S_{\omega} N_{\omega})^{-1} (\mathbf{U}_{\text{вых}} - \mathbf{B}_{\omega}). \quad (9)$$

Средняя квадратичная ошибка (СКО) и средняя относительная погрешность несмещенного и нормированного модуля угловой скорости МЭМС-датчиков до и после учета погрешностей измерений приведены в табл. 2. Фактические численные показатели этих датчиков приведены в работе [22].

Сегодня наиболее распространена обработка показаний сигнала датчиков в среде Excel или в других прикладных программах общего назначения. Однако такой способ неэффективен в случае обработки большого массива данных, особенно при многочасовых замерах для определения стабильности и шумовых характеристик сигнала. С целью оптимизации процессов обработки и расчета данных был разработан УПМК, который применяется для обработки показаний приборов на базе волоконно-оптических, твердотельно-волновых и поплавковых гироскопов, вибрационно-струнных акселерометров.

Структура унифицированного программно-математического комплекса

Основной средой для разработки УПМК (рис. 2) был выбран Python 3 – один из самых гибких языков программирования. Эта гибкость достигается за счет организации программы в виде совокупности независимых модулей (блоков), что позволяет улучшить читаемость кода и ускорить его отладку.

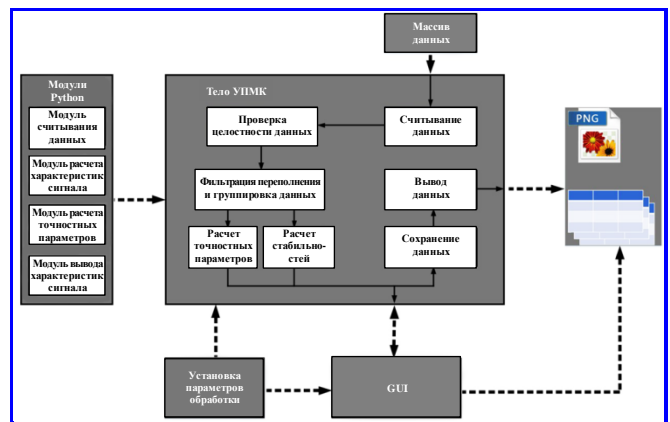


Рис. 2. Функциональная схема унифицированного программно-математического комплекса

Таблица 1

Калибровочные параметры математической модели бесплатформенных инерциальных навигационных систем при различных ориентациях

Ориентация бесплатформенных инерциальных навигационных систем	Направление осей			Измеряемые параметры	
	ДУС1	ДУС2	ДУС3	на подвижном основании	на неподвижном основании
1*	$Ox_{II} : \uparrow$	$Oy_{II} : E$	$Oz_{II} : N$	–	$\sigma G1, \sigma G2, \sigma G3, \sigma A1, \sigma A2, \sigma A3, \omega G1_{сл}, \omega G2_{сл}, \omega G3_{сл}, \omega A1_{сл}, \omega A2_{сл}, \omega A3_{сл}$
Параметры гироскопического измерительного канала					
2	↑	W	S	$\beta G1, \Delta 1G2, \Delta 2G3$	HC1, HC2
3	↑	N	W	–	HC1, HC2
4	↑	E	N	–	HC1, HC2
5	↑	S	E	–	HC1, HC2
6	↓	S	W	–	HC1, HC2
7	↓	W	N	–	HC1, HC2
8	↓	N	E	–	HC1, HC2
9	↓	E	S	–	HC1, HC2
10	N	W	↑	–	HC3
11	N	E	↓	–	HC3
12	N	↑	E	–	HC3
13	N	↓	W	–	HC3
14	45° (N, ↑)	45° (N, ↓)	W	–	HC4
15	45° (N, ↑)	W	45° (S, ↑)	–	HC4
16	45° (N, ↑)	45° (S, ↑)	E	–	HC4
17	45° (N, ↑)	E	45° (N, ↓)	–	HC4
18	45° (S, ↑)	45° (N, ↑)	W	–	HC4
19	45° (S, ↑)	W	45° (S, ↓)	–	HC4
20	45° (S, ↑)	45° (S, ↓)	E	–	HC4
21	45° (S, ↑)	E	45° (N, ↑)	–	HC4
Параметры акселерометрического измерительного канала (АИК)					
22	↑	E	N	–	$\beta A, HCa$
23	↓	E	S	–	$\beta A, HCa$
24	N	↑	E	–	$\Delta 1A1$
25	S	↓	E	–	$\Delta 1A1$
26	E	N	↑	–	$\Delta 1A2$
27	E	S	↓	–	$\Delta 1A2$

* Измеряются параметры ГИК и АИК.

Таблица 2

Средняя квадратичная ошибка и средняя относительная погрешность модуля вектора угловой скорости

Датчик	Средняя квадратичная ошибка, б/р		Средняя относительная погрешность, б/р	
	До калибровки	После калибровки	До калибровки	После калибровки
1	1	0,2121	1	0,2382
2	1	0,2192	1	0,1825

УПМК включает несколько обособленных модулей, способных работать как совместно, так и отдельно. При совместном применении модули функционально дополняют друг друга, позволяя проводить последовательные операции. Среди основных можно выделить:

- модуль сортировки и первичного считывания данных, который предварительно сортирует пакеты данных по определенным признакам (замеры при вращении станда, статические замеры, длительные замеры по определению параметров стабильности), считывает из файла данные в формате, заданном интерфейсом обмена (согласно ГОСТ Р 52070-2003), и сортирует их по группам для дальнейшего расчета;

- модуль проверки целостности данных, который идентифицирует нехарактерные состояния сигнала (потеря тактов измерительной информации);

- модуль фильтрации переполнений регистра измерительного канала;

- модуль расчета точностных параметров (масштабные коэффициенты, нулевые сигналы, углы отклонений от номинальных положений), а также другой телеметрической информации, передаваемой в выходных словах данных прибора (температура и др.);

- модуль расчета показателей стабильности прибора при длительных запусках (случайные составляющие нулевого сигнала за различное время осреднения);

- модуль сохранения обработанных первичных данных, рассчитанных точностных параметров, графиков отдельных характеристик;

- модуль вывода графических и табличных точностных и иных показателей на экран пользователя;

- блок графического интерфейса.

После загрузки файлов с первичной информацией приборов в различных ориентациях (например, в соответствии с табл. 1) в целевую директорию по указанию пользователя осуществляется считывание этих данных и проверка целостности. Далее происходит фильтрация переполнений и нехарактерных пиков в первичной информации, после чего проводится расчет точностных параметров сгруппированных данных и оценка стабильности. Рассчитанные параметры сохраняются в табличном и графическом виде для их дальнейшего вывода на экран пользователя.

Достоинством УПМК является автоматическое проведение всех указанных операций, что существенно экономит время пользователя. В случае необходимости самостоятельного проведения расчетов параметров по скорректированным формулам предусмотрено использование сохраненных обработанных массивов первичных данных.

Для простоты управления УПМК предлагается применение графического интерфейса из стандартного модуля tkinter (рис. 3, 4).

Окно обработчика предназначено для первичной обработки данных, проверки их целостности и сохранения. Оно включает в себя следующие элементы:

1 – меню выбора активного окна обработчика или окна расчета;

2 – окно со списком файлов в активной директории;

3 – окно со списком файлов, которые необходимо обработать;

4 – кнопка выбора файлов для обработки;

5 – кнопки перемещения всех файлов из одного окна в другое;

6 – кнопка удаления файлов из выбранного окна;

7 – кнопка для начала обработки;

8, 9 – графы, отображающие число файлов в активной директории, число файлов для обработки и число обработанных файлов.

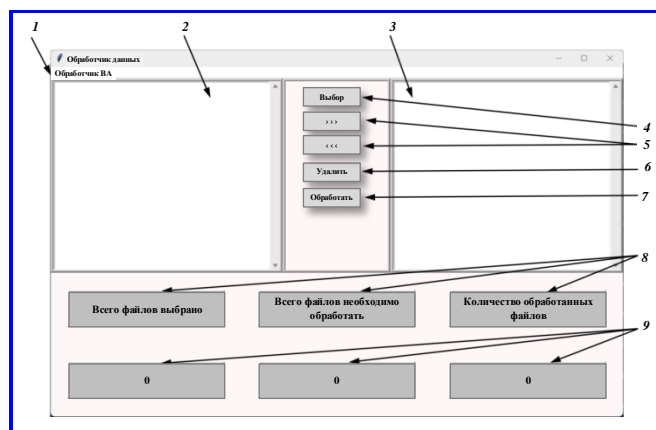


Рис. 3. Окно обработчика

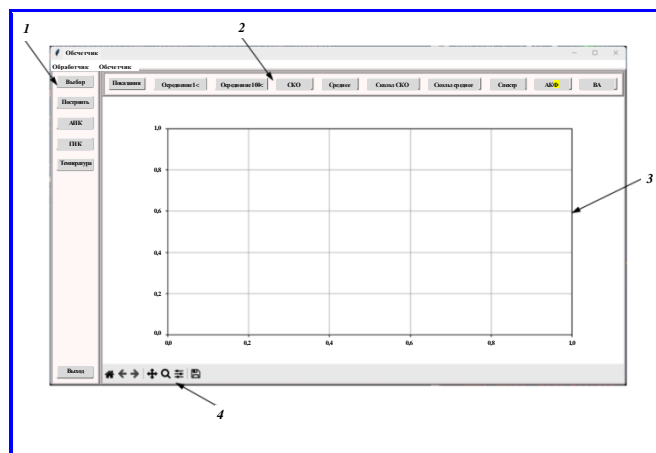


Рис. 4. Окно расчета

Окно расчета включает:

1 – блок с отображением данных по АИК, ГИК, температуре, а также кнопками для перестроения зависимостей;

2 – блок расчета показателей качества сигнала: первичных показаний, осреднения сигнала на интервале 1/100 с; построения СКО/математического ожидания, скользящего СКО/математического ожидания, спектра сигнала, автокорреляционной функции (АКФ), вариации Аллана (ВА);

3 – окно отображения графика;

4 – инструменты для управления изображением в окне отображения графика.

Рассчитанные показатели

По результатам испытаний БИНС на базе волоконно-оптических гироскопов и вибрационно-струнных акселерометров разработки филиала АО «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова» были рассчитаны при помощи УПМК точностные характеристики, определяющие параметры стабильности прибора (рис. 5 – 7). Вариация Аллана рассчитывалась по всем трем каналам. Коэффициенты корреляции Пирсона, характеризующие степень линейной зависимости между соответствующими измерительными и температурными каналами прибора, приведены в табл. 3.

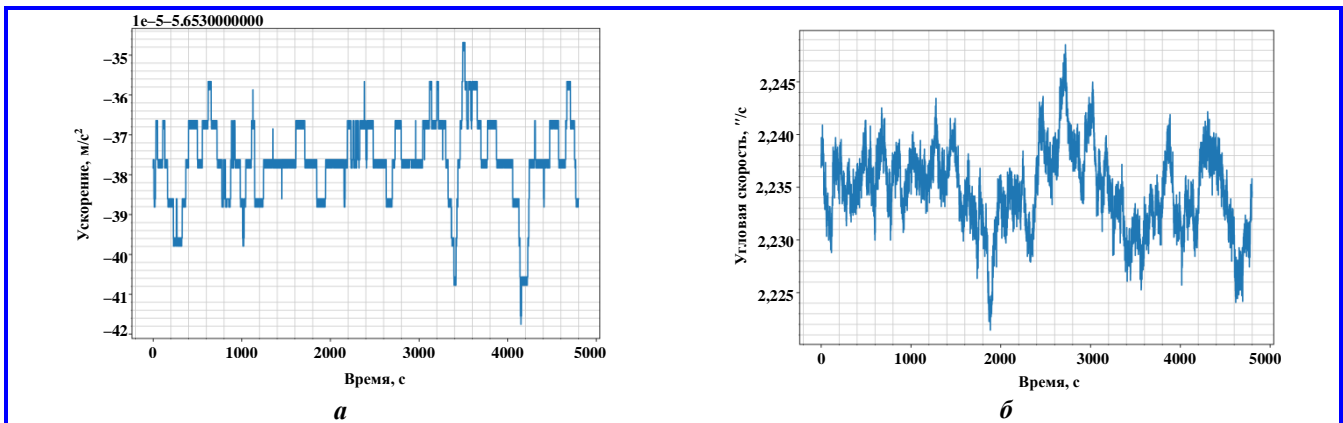


Рис. 5. Осредненные показания акселерометра (а) и гироскопа (б) на интервале осреднения 100 с

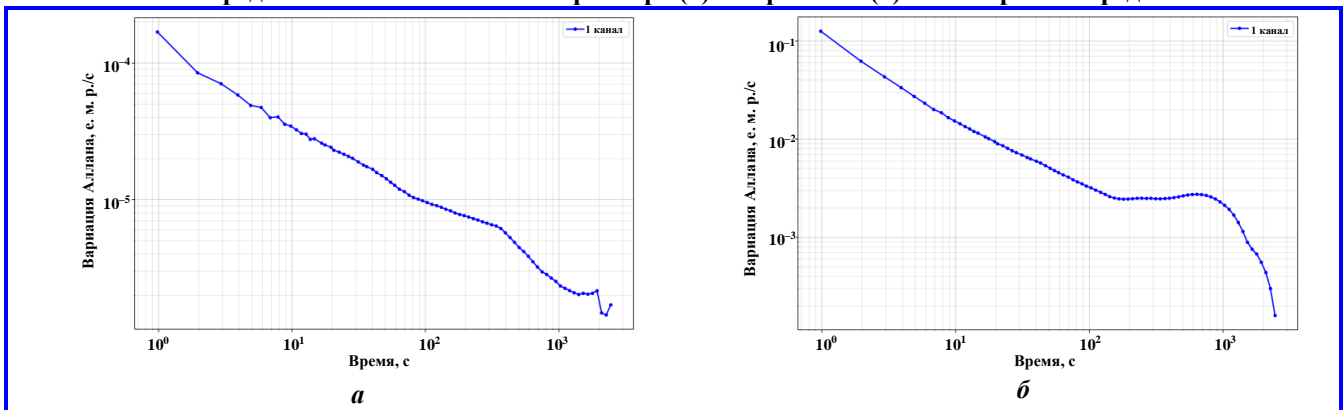


Рис. 6. Графики вариации Аллана для акселерометров (а) и гироскопов (б)

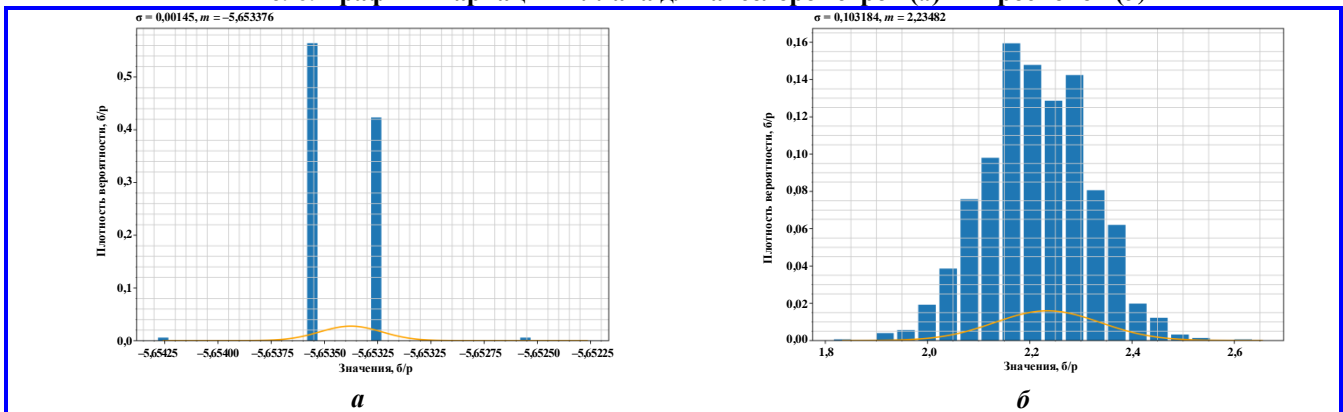


Рис. 7. Графики плотности распределения сигнала акселерометра (а) и гироскопа (б)

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Пирсона

	A1	A2	A3	Г1	Г2	Г3	T1	T2	T3
A1	1	<<1	<<1	<<1	<<1	<<1	<1	<1	<1
A2	<<1	1	<<1	<<1	<<1	<<1	<1	<1	<1
A3	<<1	<<1	1	<<1	<<1	<<1	<1	<1	<1
Г1	<<1	<<1	<<1	1	<<1	<<1	<1	<1	<1
Г2	<<1	<<1	<<1	<<1	1	<<1	<1	<1	<1
Г3	<<1	<<1	<<1	<<1	<<1	1	<1	<1	<1
T1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1	~1	~1
T2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	~1	1	~1
T3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	~1	~1	1

Обсуждение результатов

На основании полученных результатов можно отметить высокую точность АИК на базе вибрационно-струнного акселерометра. В то же время точность АИК и ГИК значительно зависит от температурной стабилизации ЧЭ, при этом система термостатирования на момент обработки результатов находилась на стадии отладки. Распределение ГИК близко к нормальному, в то время как у АИК, ввиду низкой дискретизации, данные искажены. Проведя интерполяцию, можно предположить о близости распределения АИК к нормальному. В связи с нестабильностью первичных показаний ГИК и АИК (большой диапазон разброса) приведены графики вариации Аллана в е. м. р./с, то есть коды приращений проекций интеграла угловой скорости и интеграла кажущегося ускорения за время его формирования. Спектральные плотности имеют единичные пики (из-за упомянутой нестабильности кодов), которые при переводе в стандартные единицы измерения (град./ч и м/с²) пропадают. Графики корреляционных функций показывают, что в первичных показаниях отсутствуют зависимости со сдвинутыми копиями сигнала, то есть гармонические паразитные составляющие. Таблица коэффициентов корреляции Пирсона отражает степень линейной зависимости между показаниями соответствующих каналов. Наглядно отражены зависимости показаний ЧЭ от температурных факторов, в то время как перекрестные связи между соответствующими каналами пренебрежимо малы.

Заключение

Таким образом, описанный УПМК обработки данных инерциальных приборов позволяет существенно сэкономить время проведения точностных испытаний. Отмечены методики калибровки БИНС на подвижных стендах и необходимость их проведения. Приведены нормированные СКО и относительные погрешности показаний датчиков

до и после калибровки, разница между которыми может превышать пять раз. Представлена структура, наполнение и текущее состояние разработки УПМК, последовательность выполнения операций и результаты работы. Приведены графики, выводимые УПМК и характеризующие стабильность точностных параметров инерциального прибора.

Литература

1. Проектирование бесплатформенных инерциальных навигационных систем : [учеб. пособие для вузов по специальности 160401 «Управляющие, пилотажа-навигационные и электроэнергет. комплексы летат. аппаратов»] / Б. С. Алешин, А. В. Тювин, А. И. Черноморский [и др.] ; Федер. агентство по образованию, Моск. авиац. ин-т (гос. техн. ун-т). – Москва : МАИ-Принт, 2010. – 394, [1] с.
2. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / К. К. Веремеенко, С. Ю. Желтов, Н. В. Ким [и др.] ; под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Серебрякова. – Москва : Физматлит, 2009. – 556 с.
3. Generating effective jamming against global navigation systems / S. Kostromitsky, A. Dyatko, P. Shumski [et al.] // 7th International scientific conference on defensive technologies. OTEN 2016 (Belgrade, Serbia, 6 – 7 October 2016). – P. 451–456.
4. Psiaki M. L. GNSS Spoofing and Detection / M. L. Psiaki, T. E. Humphreys // Proc. IEEE. – 2016. – Vol. 104. – Iss. 6. – P. 1258–1270.
5. Веремеенко К. К. Разработка алгоритма калибровки инерциальной навигационной системы на двухосном испытательном стенде / К. К. Веремеенко, И. А. Галай // Труды МАИ. – 2013. – № 63. – С. 10.
6. Калибровка в инерциальной навигации / Н. Б. Вавилова, И. А. Васинева, А. А. Голован [и др.] // Фундаментальная и прикладная математика. – 2018. – Т. 22. – № 2. – С. 89–115.
7. Егоров Ю. Г. Исследование программ скалярной калибровки векторного измерителя / Ю. Г. Егоров, Г. Ю. Киряченко, Е. А. Попов // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30. – № 3 (118). – С. 20–30.
8. Итерационная процедура калибровки чувствительных элементов БИНС / И. Х. Шаймарданов, А. А. Дзуев,

- Ю. Г. Егоров [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. – 2018. – № 2. – С. 3–17.
9. Pieniazek J. Ellipsoid multi-axial sensor calibration with temperature compensation / J. Pieniazek // IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace. – 2019. – P. 70–75.
10. Водичева Л. В. Оценка точностных параметров датчиков бесплатформенного инерциального измерительного блока с помощью относительно грубого поворотного стола / Л. В. Водичева, Ю. В. Парышева // Гироскопия и навигация. – 2019. – Т. 27. – № 2 (105). – С. 162–178.
11. О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним ортогонального трехгранника / Г. И. Емельянец, Б. А. Блажнов, Е. В. Драницына [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24. – № 1 (92). – С. 36–48.
12. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Е. А. Измайлов, С. Н. Лепе, А. В. Молчанов [и др.] // XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – Санкт-Петербург : ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2008. – С. 145–154.
13. Savage P. G. Improved Strapdown Inertial System Calibration Procedures. Pt. 1. Procedures and Accuracy Analysis / P. G. Savage. – Maple Plain : Strapdown Associates, 2017. – 70 p.
14. Savage P. G. Improved Strapdown Inertial System Calibration Procedures. Pt. 2. Analytical Derivations. – Maple Plain : Strapdown Associates, 2017. – 68 p.
15. Аллан Д. У. Вариации Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения / Д. У. Аллан // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 4. – С. 3–28.
16. A comparison between different error modeling of MEMS applied to GPS/INS integrated systems / A. G. Quinchia, G. Falco, E. Falletti [et al.] // Sensors. – 2013. – Vol. 13. – Iss. 8. – P. 9549–9588.
17. Матвеев В. В. Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной системы / В. В. Матвеев // Изв. ТулГУ. Техн. науки. – 2014. – № 9-2. – С. 251–267.
18. IEEE recommended practice for inertial sensor test equipment, instrumentation, data acquisition, and analysis // IEEE Aerospace and Electronic System Society. – 2005. – 103 p. – DOI : 10.1109/IEEESTD.2005.9061191.
19. Titterton D. H. Strapdown inertial navigation technology / D. H. Titterton, J. L. Weston // Institution of Engineering and Technology, American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2nd ed. – London, United Kingdom ; Reston, Virginia, USA : IET, 2004. – P. 558.
20. Aggarwal P. Thermal Calibration of low cost MEMS sensors for land vehicle navigation system / P. Aggarwal, Z. Syed, N. El-Sheimy // IEEE Vehicular Technology Conference. – Singapore, 2008. – P. 2859–2863.
21. Миков А. Г. Алгоритмы навигации автотранспорта с использованием МЭМС-датчиков грубого класса точности : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Миков Александр Геннадьевич ; Петрозав. гос. ун-т. – Петрозаводск, 2021. – 190 с.
22. Белоконов И. В. Калибровка микроэлектромеханических датчиков угловой скорости с использованием робота-манипулятора / И. В. Белоконов, В. А. С. Эпиноза // Мат. XXXIII конф. пам. выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова (СПб., 4–6 окт. 2022 г.) ; Сам. нац. исслед. ун-т им. акад. С. П. Королева. – Санкт-Петербург : Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. – С. 12–14.

Поступила в редакцию 17.08.2023

Владислав Павлович Наумченко, инженер 1 категории, e-mail: V.Naumchenko@russian.space, т. 8 (495) 221-86-33.

Павел Алексеевич Илюшин, главный специалист, e-mail: P.Ilyushin@russian.space, т. 8 (495) 221-86-33.

Дмитрий Григорьевич Пикун, начальник отдела, e-mail: D.Pikunov@russian.space, т. 8 (495) 221-86-33.

Алексей Владимирович Соловьёв, кандидат технических наук, начальник отделения, e-mail: AV.Solovev@russian.space, т. 8 (495) 276-02-65.

(Филиал АО «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова»).

PROCESSING OF INERTIAL DEVICES READINGS ON UNIFIED SOFTWARE AND MATHEMATICAL COMPLEX

V. P. Naumchenko, P. A. Ilushin,
D. G. Pikunov, A. V. Solovyov

In this paper, we discuss the basics of building a unified software and mathematical complex for data processing of inertial devices and systems, its structure and detailed description are presented. The influence of instrumental errors of inertial sensors on the accuracy of solving the problem of orientation and navigation in autonomous mode is defined and the need for calibration of sensors is shown. One of the possible calibration methods of a strapdown inertial navigation system in different orientations is shown, and the method of processing experimental data, as well as the results of improving the readings of the system after calibration, is given.

Developed in Python 3, the complex is used to process instrument readings based on fiber-optic gyroscopes, vibration-string accelerometers, solid-state wave gyroscopes and float gyroscopes. It's main advantage lies in its modularity, i. e. each component is able to work independently of the others. The possibilities of the complex are presented on the example of processing the test results of a strapform measuring unit based on fiber-optic gyroscopes and vibration-string accelerometers.

Key words: strapdown inertial navigation system, instrumental errors, calibration, Python, unified software and mathematical complex.

References

1. Design of strapdown inertial navigation systems [Textbook for universities in the speciality 160401 'Control, flight, navigation and power supply complexes of aircrafts'] / B. S. Aleshin, A. V. Tyuvin, A. I. Chernomorskiy [et. al]; Federal Education Agency, Moscow Aviation Institute (State Technical University). – Moscow : MAI-Print, 2010 – 394, [1] p.
2. Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned flying systems / K. K. Veremeenko, S. Yu. Zhetlov, N. V. Kim [et al]; edited by M. N. Krasilshikova, G. G. Serebryakov. – Moscow, Fizmatlit, 2009. – 556 p.
3. Generating effective jamming against global navigation systems / S. Kostromitsky, A. Dyatko, P. Shumski [et al.] // 7th International scientific conference on defensive technologies. OTEH 2016 (Belgrade, Serbia, 6–7 October 2016). – P. 451–456.
4. Psiaki M. L. GNSS Spoofing and Detection / M. L. Psiaki, T. E. Humphreys // Proc. IEEE. – 2016. – Vol. 104. – Iss. 6. – P. 1258–1270.
5. Veremeenko K. K. Development of inertial navigation system calibration algorithms at two-axles test bench / K. K. Veremeenko, I. A. Galay // Trudy MAI. – 2013. – No. 63. – 10 p.
6. Calibration in inertial navigation / N. B. Vavilov, I. A. Vasineva, A. A. Golovan [et al] // Fundamental and applied mathematics. – 2018. – Vol. 2. – No. 2. – P. 89–115.
7. Egorov Ya. G. Research of scalar calibration of vector measuring instrument / Ya. G. Egorov, G. Yu Kiryachenko, E. A. Popov // Gyroscopy and navigation. – 2022. – Vol. 30. – No. 3 (118). – P. 20–30.
8. Iteration procedure of calibration of strapdown inertial navigation system sensing elements / I. H. Shaymardanov, A. A. Dzuev, Yu. G. Egorov [et al] // Aerospace instrumentation. – 2018. – Vol. 2. – P. 3–17.
9. Pieniasek J. Ellipsoid multi-axial sensor calibration with temperature compensation / J. Pieniasek // IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace. – 2019. – P. 70–75.
10. Vodicheva L. V. Estimation of accuracy parameters of strapdown inertial measuring unit sensors using a relatively coarse turning table / L. V. Vodicheva, Yu. V. Parisheva // Gyroscopy and Navigation. – 2019. – Vol. 27 – Vol. 2 (105). – 162–178 p.
11. About calibration of precision strapdown inertial navigation system measuring module and generation of dependant orthogonal trihedron. / G. I. Emelyantsev, B. A. Blazhnov, E. V. Dranitsina [and others] // Gyroscopy and Navigation. – 2016. – Vol. 24 – No. 1 (92) – 36–48 p.
12. Scalar method of calibration and balancing of strapdown inertial navigation systems / E.A. Izmaylov, S. N. Lepe, A. V. Molchanov [et al.] // XV Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – Saint-Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2008 – 145–154 p.
13. Savage P. G. Improved Strapdown Inertial System Calibration Procedures. Pt. 1. Procedures and Accuracy Analysis / P. G. Savage. – Maple Plain: Strapdown Associates, 2017. – 70 p.
14. Savage P. G. Improved Strapdown Inertial System Calibration Procedures. Pt. 2. Analytical Derivations. – Maple Plain: Strapdown Associates, 2017. – 68 p.
15. Allan D. U. Variation of Allan: History of creation, advantages and disadvantages, primary areas of applicability / D. U. Allan // Gyroscopy and Navigation. – 2015 – No. 4. – P. 3–28.
16. A comparison between different error modelling of MEMS applied to GPS/INS integrated systems / A. G. Quinchia, G. Falco, E. Falletti [et al.] // Sensors. – 2013. – Vol. 13. – Iss. 8. – P. 9549–9588.
17. Matveev V. V. Engineering analysis of strapdown inertial system errors / V. V. Matveev // Izvestia TulGU: Technical sciences. – 2014. – No. 9–2. – P. 251–267.
18. EEE recommended practice for inertial sensor test equipment, instrumentation, data acquisition, and analysis // IEEE Aerospace and Electronic System Society. – 2005. – 103 p. – DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.9061191.
19. Titterton D. H. Strapdown inertial navigation technology / D. H. Titterton, J. L. Weston // Institution of Engineering and Technology, American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2nd ed. – London, United Kingdom; Reston, Virginia, USA : IET, 2004. – P. 558.
20. Aggarwal P. Thermal Calibration of low cost MEMS sensors for land vehicle navigation system / P. Aggarwal, Z. Syed, N. El-Sheimy // IEEE Vehicular Technology Conference. – Singapore, 2008. – P. 2859–2863.
21. Mikov A. G. Motor transport navigation algorithms with the usage of coarse accuracy class MEMS-based sensors: speciality 05.13.18 'Mathematical simulation, numerical methods and packages of programs': Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences / Mikov Aleksandr Gennadievich; Petrozavodsk State University. – Petrozavodsk, 2021 – 190 p.
22. Belokonov I. V. Calibration of micro electromechanical sensors of angle rate using a robotic manipulator / I. V. Belokonov, V. A. S. Spinoza // Proceedings of XXXIII Conference in the Memory of Outstanding Designer of Gyroscopic Instruments N. N. Ostriakov (Saint-Petersburg, 4–6 October, 2022); Samara National Research University named after academician S. P. Korolev. – Saint-Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2022. – P. 12–14.

Vladislav Pavlovich Naumchenko, 1st category engineer, e-mail: V.Naumchenko@russian.space, t. 8 (495) 221-86-33.

Pavel Alekseevich Ilushin, chief specialist, e-mail: P.Ilyushin@russian.space, t. 8 (495) 221-86-33.

Dmitriy Grigoryevich Pikunov, head of department, e-mail: D.Pikunov@russian.space, t. 8 (495) 221-86-33.

Alexey Vladimirovich Solovyov, candidate of technical sciences, department director,

e-mail: AV.Solovev@russian.space, t. 8 (495) 276-02-65.

(Branch of JSC «TsENKI» – «NII PM named after V. I. Kuznetsov»).