

Расчетно-экспериментальная оценка оптимизационного алгоритма начальной выставки инерциальной платформы

© В.П. Наумченко

Филиал АО «ЦЭНКИ» — «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»,
Москва, 111024, Российская Федерация

Приведены результаты экспериментальной отработки нового оптимизационного алгоритма начальной выставки, подходящего для инерциальных навигационных систем платформенного или бесплатформенного класса на вращающемся основании. Ранее в своих теоретических исследованиях построения оптимизационного алгоритма начальной выставки инерциальных навигационных систем для ракет космического назначения, влияния шумов измерений на точность и быстродействие выставки, а также для моделирования работы алгоритма автор выбирал метод наискорейшего спуска в качестве основы. На заключительном этапе исследования приведены результаты полунатурного моделирования алгоритма при решении задачи начальной выставки платформы, а также частных, но не менее важных с точки зрения применения, задач горизонтирования одноосной платформы, азимутального гирокомпасирования и выставки бесплатформенной навигационной системы с вращающимся блоком чувствительных элементов вокруг оси вращения, равноотклоненной от осей чувствительности измерительных каналов. В качестве первичного измерителя был использован бесплатформенный измерительный блок на базе вибрационно-струнных акселерометров и волоконно-оптических гироскопов, а для имитации платформы — трехосный имитатор движения. Проведены оценка разброса полученных результатов и сравнение их с результатами имитационного моделирования с целью подтверждения правильности составленных моделей.

Ключевые слова: бесплатформенный измерительный блок, гироплатформа, трехосный имитатор движения, горизонтирование, гирокомпасирование, оптимизационный алгоритм выставки, метод градиентного спуска

Введение. Инерциальные навигационные системы (ИНС), а также другие гироскопические приборы являются основой для построения навигационных комплексов подвижных аппаратов различных классов и применений [1–3]. В частности, одноосные гиростабилизированные платформы (ГСП) широко используются в разных системах стабилизации и наведения, служат для стабилизации отдельных приборов и устройств [4–6]. Еще один не менее важный прибор — гирокомпас (ГК), выполняющий азимутальную привязку объекта [7–9].

В число важнейших задач входит начальная выставка ИНС, одноосных ГСП и ГК. Большое количество недавних публикаций как в России, так и за рубежом свидетельствует об актуальности исследований в этом направлении [10–13].

Автор продолжает исследование в области построения оптимизационного алгоритма начальной выставки платформенных ИНС. В ранее опубликованных работах, проводимых в этом направлении [14–16], приведены основы построения оптимизационного алгоритма начальной выставки, рассмотрено влияние шумов на его точность и быстродействие, а также выполнено математическое моделирование алгоритма. Основа алгоритма состоит в итерационном вращении платформы и оценке средних величин измеряемых проекций вектора ускорения свободного падения и вектора угловой скорости вращения Земли в этих положениях. На основе полученных оценок измерений выполнялся расчет антиградиентов показаний d и параметров масштаба методов λ , по которым осуществляется расчет шага поворота платформы. Конец работы алгоритма наступает при совмещении платформенного базиса с географическим базисом.

Цель работы — апробация разрабатываемого оптимизационного алгоритма при решении задачи горизонтирования одноосного стабилизатора, азимутальной выставки гирокомпы, начальной выставки трехосной платформы, а также выставки БИНС с вращающимся БЧЭ.

В качестве оптимизационного метода применяется градиентный метод наискорейшего спуска, причем возможны два концептуально разных способа формирования алгоритма:

– первый заключается в классическом строгом расчете параметра масштаба метода λ через производную от уравнения измерения показаний на ось чувствительности (ОЧ) чувствительного элемента (ЧЭ) в зависимости от угла [17, 18];

– второй состоит в вычислении λ без использования производной, а непосредственно подстановкой средней оценки измерений ЧЭ в конкретном положении.

Модель выставки и используемое оборудование. В качестве первичного измерителя во время эксперимента использовался бесплатформенный измерительный блок (БИБ) на базе вибрационно-струнных акселерометров (ВСА) [19] и волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) [20]. Точностные характеристики указанных датчиков также приведены в работах [19, 20]. Для имитации платформы был применен предназначенный для испытаний и калибровки инерциальных приборов трехосный имитатор движения, отличающийся высокой точностью позиционирования и вращения с неограниченным углом поворота по внешней оси и U-образной внутренней осью [21]. Запись измерений проводилась на интервале опроса 50 мс.

Ортогональный трехгранник $Ox_n y_n z_n$ связан с корпусной системой координат (КСК) прибора. Поскольку геометрия блока чувствительных элементов (БЧЭ) прибора имеет конусную структуру, переход от системы координат, связанной с ЧЭ ($Ox_{чЭ} y_{чЭ} z_{чЭ}$), к СК, связанной с КСК, осуществлялся с помощью следующей матрицы:

$$C_{\text{ЧЭ}}^{\text{КСК}} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \cos \alpha & \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \varphi_1 & \sin \alpha & \sin \alpha \cos \varphi_3 \\ \sin \alpha \sin \varphi_1 & \sin \alpha \sin \varphi_2 & \sin \alpha \sin \varphi_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где α — угол раствора конуса; φ_i — углы поворота ОЧ в вертикальной плоскости.

Прибор был предварительно откалиброван, что позволяет учесть систематические составляющие в математической модели показаний. В таком случае она примет вид

$$\begin{pmatrix} N_{x_n} \\ N_{y_n} \\ N_{z_n} \end{pmatrix} = \left(E \begin{pmatrix} S_{11} + \delta S_{11} \\ S_{22} + \delta S_{22} \\ S_{33} + \delta S_{33} \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta N_x \\ \delta N_y \\ \delta N_z \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Здесь $N_{x,y,z}$ — величины проекций угловой скорости вращения Земли и проекций ускорения свободного падения на ОЧ соответствующих гироскопов и акселерометров; E — единичная матрица; $N = \Omega_{x_n, y_n, z_n}$; S_{11}, S_{22}, S_{33} — номинальные значения масштабных коэффициентов; $\delta S_{11}, \delta S_{22}, \delta S_{33}$ — случайные погрешности масштабных коэффициентов; $\delta N_{x,y,z}$ — случайные составляющие нулевого сигнала.

Из системы (2) следует, что основное влияние на точность выходного сигнала оказывают шумы измерений, причем особенно сильное — розовый шум (случайного мерцания в электронных компонентах датчика), а также красный шум (нестабильности температур или градиентов температур и нестабильности источника питания), приводящие к увеличению времени выставки на десятки и сотни процентов соответственно [14, 15]. Для того чтобы компенсировать тепловые процессы, измерения проводились при включенной системе термостатирования (СТС) прибора, стабилизирующей точность поддержания температуры ЧЭ на уровне сотых долей градуса Цельсия. Снижение влияния шумов других типов осуществляется посредством цифровой фильтрации показаний.

Обобщенная математическая модель алгоритма начальной выставки имеет вид

$$\begin{cases} \alpha_k^1 = \alpha_{k-1}^1 + h_{\alpha_{k-1}^1}^1 \lambda_{\alpha_{k-1}^1}^1 d_{\alpha_{k-1}^1}^1; \\ \alpha_k^2 = \alpha_{k-1}^2 + h_{\alpha_{k-1}^2}^2 \lambda_{\alpha_{k-1}^2}^2 d_{\alpha_{k-1}^2}^2; \\ \dots \\ \alpha_k^n = \alpha_{k-1}^n + h_{\alpha_{k-1}^n}^n \lambda_{\alpha_{k-1}^n}^n d_{\alpha_{k-1}^n}^n, \end{cases} \quad (3)$$

где $\alpha_k^1 \dots \alpha_k^n$, $\alpha_{k-1}^1 \dots \alpha_{k-1}^n$ — углы ориентации n -осной платформы на k -м и $(k-1)$ -м такте выставки (в k -й и $(k-1)$ -й ориентации платформы); $h_{\alpha_{k-1}^1}^1 \dots h_{\alpha_{k-1}^n}^n$ — шаги разворота платформы по соответствующим угловым каналам, которые в зависимости от метода автоматически устанавливаются в блоке формирования критерия; $d_{\alpha_{k-1}^1}^1 \dots d_{\alpha_{k-1}^n}^n$ — анти-градиенты показаний ЧЭ по соответствующим осям; $\lambda_{\alpha_{k-1}^1}^1 \dots \lambda_{\alpha_{k-1}^n}^n$ — параметры, определяющие длину шага по соответствующим осям.

Модели показаний при горизонтировании и гироскомпасировании одноосной платформы, а также выраженные углы разворота платформы имеют вид

$$\begin{cases} A_x = \Delta f = g \sin \gamma; \\ G_x = \Delta f = \Omega \cos \varphi \sin \psi; \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \gamma = \arcsin(A_x / g); \\ \psi = \arccos(G_x / \Omega \cos \varphi). \end{cases} \quad (4)$$

Здесь и далее A_x , G_x — показания акселерометров и гироскопов на соответствующие оси; γ — угол отклонения платформы от плоскости горизонта; Ω — угловая скорость вращения Земли, $\Omega = 15,041$ град/ч; φ — широта проведения испытаний, $\varphi = 55,7519^\circ$; ψ — угол отклонения платформы от плоскости географического Севера; g — ускорение свободного падения в месте проведения испытаний, $g = 9,8156$ м/с².

Далее приводятся модель показаний и вычисляемые углы ориентации при выставке трехосной платформы:

$$\Delta f = \begin{cases} A_x = g \sin \vartheta, \\ A_y = -g \sin \gamma \cos \vartheta, \\ A_z = g \cos \gamma \cos \vartheta, \\ G_x = \Omega_r \cos \psi \cos \vartheta + \Omega_b \sin \vartheta, \\ G_y = \Omega_r [\sin \gamma \sin \vartheta \cos \psi + \sin \psi \cos \gamma] - \Omega_b \sin \gamma \cos \vartheta, \\ G_z = \Omega_r [\sin \gamma \sin \psi - \sin \vartheta \cos \gamma \cos \psi] + \Omega_b \cos \gamma \cos \vartheta, \end{cases} \quad (5)$$

где γ , ϑ , ψ — углы крена, тангажа и курса; $\Omega_r = \Omega \cos \varphi$, $\Omega_b = \Omega \sin \varphi$ — горизонтальная и вертикальная проекции угловой скорости вращения Земли.

Алгоритм выставки БИНС с вращающимся БЧЭ строится на основе необходимости приведения какой-либо ОЧ по направлению вектора \bar{g} . Две другие оси в этом случае будут лежать в плоскости горизонта (рис. 1). Для выставки соответствующей оси вертикально подается команда X , Y , Z , в зависимости от которой формируется логика работы алгоритма. Например, при появлении команды выставки вертикально оси X антиградиент и параметр λ вычисляются по показаниям этого

акселерометра, а момент окончания алгоритма, т. е. достижения требуемого точностного диапазона, — по двум другим акселерометрам, поскольку поиск происходит по функции синуса в точке с наибольшей крутизной характеристики.

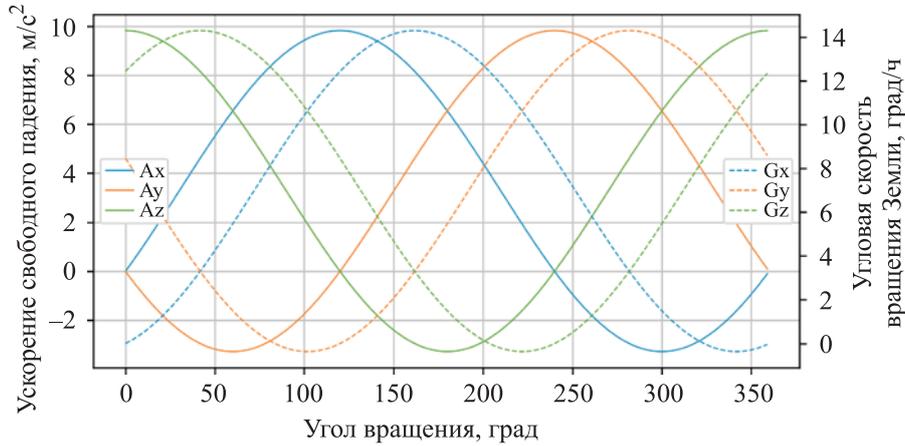


Рис. 1. Проекции акселерометров и гироскопов на оси корпусной системы координат

Модель выставки БИНС с вращающимся БЧЭ и вычисляемый угол разворота БЧЭ имеют вид

$$\Delta f = \begin{cases} A_x = g \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sin v - \frac{1}{3} \cos v + \frac{1}{3} \right); \\ A_y = g \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} \sin v - \frac{1}{3} \cos v + \frac{1}{3} \right); \\ A_z = g \left(\frac{2}{3} \cos v + \frac{1}{3} \right); \end{cases} \rightarrow \begin{cases} v = \arcsin \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{A_x - A_y}{g} \right) \right); \\ v = \arccos \left(\frac{2g - 3A_x - 3A_y}{2g} \right); \\ v = \arccos \left(\frac{3A_z - 4g}{2g} \right). \end{cases} \quad (6)$$

Способы расчета антиградиентов d и параметров λ в зависимости от подхода к построению выставки — классического (КП) или модифицированного (МП) — представлены ниже:

$$\begin{cases} d_{\alpha_k}^n = \left| -\nabla f_k^n (\alpha_k^1 \dots \alpha_k^n) \right|; \\ \lambda_{\alpha_k}^n = \left| \alpha_k^{n*} - \alpha_k^n \right| / d_{\alpha_k}^n; \end{cases} \quad \begin{cases} d_{\alpha_k}^n = \left| N_{\alpha_k^n} (\alpha_k^1 \dots \alpha_k^n) - N_{\alpha_{k-1}^n} (\alpha_{k-1}^1 \dots \alpha_{k-1}^n) \right|; \\ \lambda_{\alpha_k}^n = \left| N_{\alpha_k^n} (\alpha_k^1 \dots \alpha_k^n) \right| / d_{\alpha_k}^n. \end{cases} \quad (7)$$

Как видно из (7), для расчета антиградиентов $d_{\alpha_k}^n$ и коэффициентов $\lambda_{\alpha_k}^n$ КП необходима модель измерений ЧЭ, на основе которой выполняется расчет матрицы производных по углам ориентации

платформы: для одноосного горизонтирования — по углу γ ; для одноосного гирокомпасирования — по углу ψ ; для трехосной выставки — по углам γ, ϑ, ψ ; для выставки БИНС с вращающимся БЧЭ — по углу ν .

Определение углов α^n и коэффициента λ осуществляется через необходимое условие экстремума:

$$\begin{aligned} & \Phi'(\lambda), \\ & \downarrow \\ & g \cos(\vartheta_i + h_{\vartheta_i} \lambda_{\vartheta_i} d_{\vartheta_i}) = 0; \quad -\Omega_2 \sin(\psi_i + h_{\psi_i} \lambda_{\psi_i} d_{\psi_i}) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Левое уравнение в (8) необходимо для определения углов α^n канала горизонтирования, а правое — для канала гирокомпасирования. Правое уравнение записывается при условии $\vartheta \rightarrow 0$, соответствующему горизонтальной ориентации платформы. Далее разрешим уравнения (8):

$$\vartheta_i + h_{\vartheta_i} \lambda_{\vartheta_i} d_{\vartheta_i} = \pm(2n+1)\frac{\pi}{2}; \quad \psi_i + h_{\psi_i} \lambda_{\psi_i} d_{\psi_i} = \pm n\pi. \quad (9)$$

Принимая в расчет недопустимость опрокидывания платформы (т. е. углы отклонения от плоскости горизонта не могут превышать 90°), а также полагая $h_{\vartheta_i} = h_{\psi_i} = 1$, получим из (7) выражения для КП.

Контрольные углы α^n для канала горизонтирования равны соответственно 90° , а для канала гирокомпасирования они могут варьироваться и составлять $0, 180^\circ$ и 360° .

При расчете антиградиентов $d_{\alpha_k^n}$ и параметров $\lambda_{\alpha_k^n}$ для МП достаточно знать только показания ЧЭ на текущем и предыдущем такте выставки (промежуточных ориентациях платформы).

Результаты испытаний и их анализ. Результаты испытаний по горизонтированию одноосной платформы приведены на рис. 2. Численные характеристики работы алгоритма представлены в табл. 1. Устанавливались начальный угол отклонения платформы от плоскости горизонта $\alpha = 30^\circ$, заданная точность выставки $\Delta = 0,05^\circ$, начальный шаг для КП и МП выбирался равным 1, параметры $ov_{angle} = 30^\circ$, а ov равным 1 для КП и 4 для МП. Поскольку условием окончания алгоритма является нахождение показаний акселерометров в установленном точностном диапазоне, графики приведены для показаний акселерометров.

Как видно, результаты отработки алгоритма достаточно близко сходятся с моделью. В алгоритме КП присутствует значительное перерегулирование, которое достигает почти 30° , в то время как в случае МП

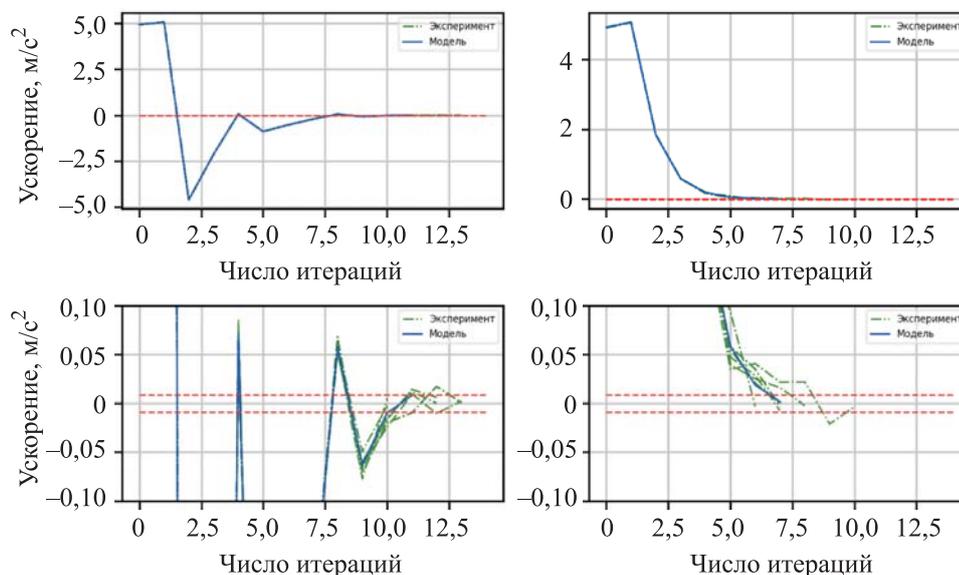


Рис. 2. Горизонтирование одноосной платформы

Таблица 1

Результаты испытаний по горизонтированию одноосной платформы

Номер	КП			МП		
	i	$\Delta\alpha$, град	σ , град	i	$\Delta\alpha$, град	σ , град
1	13	0,0041	27,99	9	0,0304	0,03
2	14	0,0206	28,00	8	0,0550	0,00
3	11	0,0510	27,85	7	0,0480	0,00
4	11	0,0480	28,00	8	0,0294	0,00
5	13	0,0054	28,00	11	0,0184	0,06
6	8	0,0023	27,56	8	0,0023	0,01

перерегулирование вовсе практически отсутствует и характер выставки является аperiodическим. По числу итераций явное преимущество у МП, поскольку он быстрее КП на 15...35%. В каждой ориентации замер проводился в течение 15 с, и, таким образом, самая быстрая выставка проводилась за 1,75 мин, а самая продолжительная — за 3,25 мин. Точность выставки преимущественно соответствовала требуемой, однако из-за вероятной недостаточной температурной компенсации в показаниях, приводящих к дополнительному смещению нуля, имеются реализации, незначительно превышающие требуемое значение. Итак, можно считать, что предлагаемый алгоритм горизонтирования показывает достойный результат, сохраняя высокое быстродействие и высокую точность выставки.

Результаты испытаний по гироскомпасированию одноосной платформы приведены на рис. 3. Численные характеристики работы алгоритма представлены в табл. 2. Устанавливались начальный угол отклонения платформы от плоскости горизонта $\psi = 60^\circ$, заданная точность выставки $\Delta = 0,1^\circ$, начальный шаг выбирался равным 1,2 для КП и 1,0 для МП, параметры ov_{angle} и ov равными 30° и 4 соответственно для КП и МП. Поскольку условием окончания алгоритма является нахождение показаний гироскопов в установленном точностном диапазоне, графики приведены для показаний гироскопов.

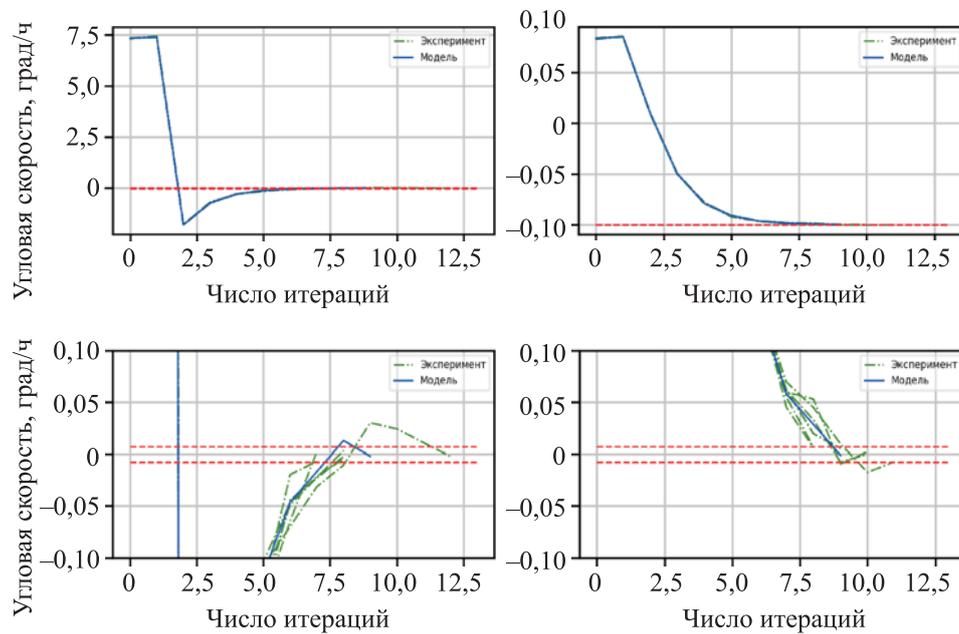


Рис. 3. Гироскомпасирование одноосной платформы

Таблица 2

Результаты испытаний по гироскомпасированию одноосной платформы

Номер	КП			МП		
	i	$\Delta\psi$, град	σ , град	i	$\Delta\psi$, град	σ , град
1	13	0,0136	12,23	11	0,0922	0,09
2	9	0,0866	12,23	12	0,1000	0,00
3	8	0,1128	12,24	11	0,0956	0,09
4	9	0,0866	12,24	9	0,0887	0,00
5	8	0,1136	12,23	9	0,1092	0,00
6	9	0,0869	12,23	10	0,0231	0,02

В результате гироскомпасирования платформы КП оказался быстрее на 15...30 %, чем МП, даже при отсутствии перерегулирования у последнего. Перерегулирование у КП не превышает $12,5^\circ$, что не является критическим, поскольку далее процесс выставки так же, как и при МП, имеет аperiodический характер. В каждой ориентации замер проводился в течение 20 с, и самая быстрая выставка проходила за 2,66 мин, а самая длительная — за 4,33 мин. Точность выставки оказалась преимущественно на заданном уровне, однако имеются реализации, где ошибка превышает требование, но не более чем на $0,02^\circ$. Это связано с недостаточной компенсацией систематических составляющих нулевых сигналов гироскопов. Для увеличения точности выставки необходимо заново откалибровать гироскопические каналы, а также увеличить время замера в промежуточных ориентациях.

Результаты испытаний по выставке БИНС с вращающимся БЧЭ приведены на рис. 4. Численные характеристики работы алгоритма представлены в табл. 3. Выдавалась команда для выставки оси X вверх. Устанавливались начальный угол отклонения платформы от плоскости горизонта $\nu = 40^\circ$, заданная точность выставки $\Delta = 0,05^\circ$, начальный шаг выбирался равным 0,9 для КП и МП, параметры ov_{angle} выбиралась равными 20° , а ov — равным 1 и 4 соответственно для КП и МП.

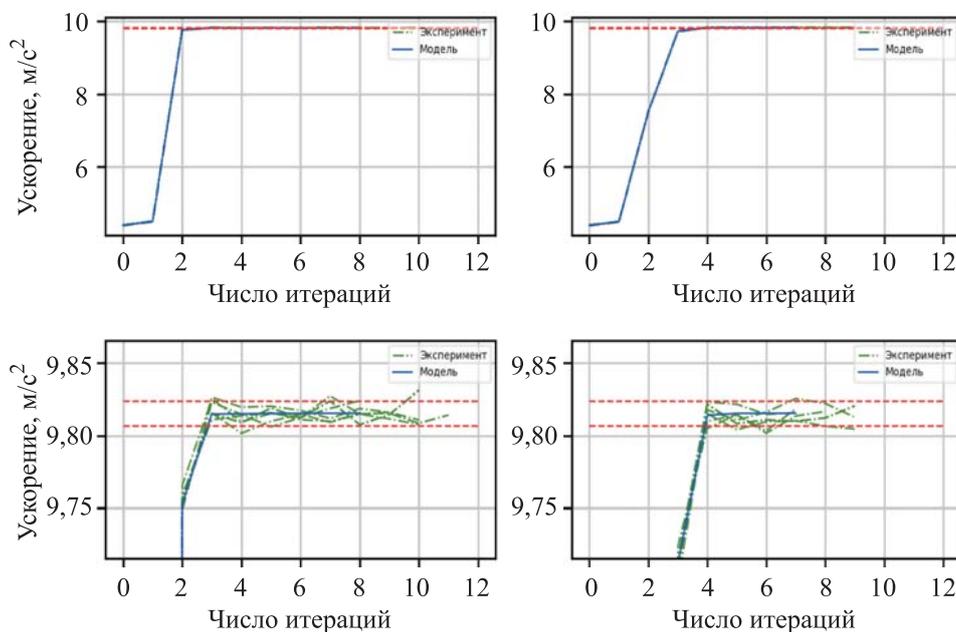


Рис. 4. Выставка БИНС с вращающимся БЧЭ

Результаты испытаний по выставке БИНС с вращающимся БЧЭ

Номер	КП			МП		
	i	Δv , град	σ , град	i	Δv , град	σ , град
1	9	0,0412	0,00	9	0,0302	0,00
2	10	0,1090	0,11	10	0,0111	0,00
3	11	0,0342	0,11	8	0,0604	0,00
4	11	0,0337	0,11	8	0,0394	0,00
5	12	0,0409	0,00	10	0,0331	0,00
6	11	0,0784	0,00	10	0,04154	0,00

В случае как КП, так и МП отсутствует перерегулирование при выбранных настройках алгоритма, процесс выставки имеет аперриодический характер. Продолжительность замера в каждой промежуточной ориентации составила 30 с. Быстродействие алгоритма и в случае КП, и в случае МП находится на одном уровне, с небольшим перевесом у МП. В среднем продолжительность выставки для КП занимает 5,33 мин, а для МП — 4,55 мин. Ошибка выставки не превышает во всех реализациях $0,12^\circ$. Следует отметить тот факт, что отсутствуют неустойчивые реализации и закливание. Это связано с дополнительной фильтрацией выходной информации на этапе постобработки показаний.

Заключение. Рассмотрено построение оптимизационного алгоритма начальной выставки ИНС с ГСП, а также БИНС с вращающимся БЧЭ. Представлены модели измерений, а также математические основы алгоритма, реализованного с помощью двух концептуальных подходов — КП и МП. Приведены методика проведения апробации алгоритма, результаты его проверки при горизонтировании и гирокомпасировании платформы, а также при выставке БИНС с вращающимся БЧЭ. Ошибка выставки во всех задачах не превышала $0,12^\circ$, а продолжительность — 5,3 мин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алешин Б.С., Тювин А.В., Черноморский А.И., Плеханов В.Е. *Проектирование бесплатформенных инерциальных навигационных систем*. Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010, 378 с.
- [2] Xu H., Geng D., Fan Z., Wu D., Chen M. An automatic vehicle navigation system based on filters integrating inertial navigation and global. *Positioning Systems. Machines*, 2024, vol. 12, no. 9, 663. <https://doi.org/10.3390/machines12090663>
URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/12/9/663> (дата обращения: 10.03.2025).
- [3] Liang M., Zheng D., Li K., Fang X., Wu G. Application and prospect of strapdown inertial navigation system in coal mining equipment. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 21, 6836. <https://doi.org/10.3390/s24216836>
URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/21/6836> (дата обращения: 10.03.2025).

- [4] Sathit P., Chatchapol C., Phansak I. Non-linearity analysis of ship rolls gyro-stabilizer control system. *Sustainable Marine Structures*, 2021, vol. 3, iss. 1, pp. 8–21. <https://doi.org/10.36956/sms.v3i1.316>
URL: <https://journals.nasspublishing.com/index.php/sms/article/view/316> (дата обращения: 10.03.2025).
- [5] Xiaoyu Zhang, Qianjie Liu, Jun Liu, Qingyuan Zhu. Using gyro stabilizer for active anti-rollover control of articulated wheeled loader vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, no. 235 (2), pp. 237–248.
<https://doi.org/10.1177/0959651820937114>
URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0959651820937114> (дата обращения: 10.03.2025).
- [6] Кривошеев С.В., Лукин К.О. Одноосный силовой горизонтальный гиростабилизатор. Пат. № 2748143 Российская Федерация, 2021, бюл. № 14, 10 с.
- [7] Норсеев С.А., Буров Д.А., Тютюгин Д.Ю. Методы гироскомпасирования для выносного высокоточного гироскомпаса. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2020, вып. 1, с. 51–64.
- [8] Feng Sun, Jianzhong Xia, Yueyang Ben, Haiyu Lan. Time-varying parameters based gyrocompass Alignment for marine SINS with large heading misalignment. *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium – PLANS 2014*, pp. 1379–1383. IEEE Xplore. DOI: 10.1109/PLANS.2014.6851513 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6851513> (дата обращения: 10.03.2025).
- [9] Spielvogel A.R., Whitcomb L.L. Adaptive bias and attitude observer on the special orthogonal group for true-north gyrocompass systems: Theory and preliminary results. *The International Journal of Robotics Research*, 2020, vol. 39, iss. 2–3, pp. 321–338. DOI: 10.1177/0278364919881689 URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0278364919881689> (дата обращения: 10.03.2025).
- [10] Jinyong Yang, Guanqin Zhang, Zhe Huang et al. Research on position and orientation measurement method for roadheader based on vision/INS. In: *Proc. SPIE 10621, 2017, International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems*, 2018, vol. 10621, pp. 1062105-1–1062105-12.
- [11] Liu H.Y., Tsa, S., Tsai M.L., Chiang K.W. An initial alignment method of inertial navigation system for the static state. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2022, vol. 43, iss. B1-2022, pp. 227–233.
URL: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Volume/10621>. (дата обращения: 10.03.2025).
- [12] Jiazhen Lu, Lili Ye, Jong Dong. Applied singular value decomposition method in transfer alignment and bias calibration. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, vol. 14, iss. 5, pp. 700–706. DOI: 10.1049/iet-rsn.2019.0397
URL: <https://colab.ws/articles/10.1049%2Fiet-rsn.2019.0397> (дата обращения: 10.03.2025).
- [13] Веремеенко К.К., Жарков М.В., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Трансферная выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы: алгоритмические особенности и численный анализ характеристик. *Авиационная техника*, 2020, № 4, с. 57–64.
- [14] Наумченко В.П., Илюшин П.А., Пикунов Д.Г., Соловьев А.В. Оценка влияния шумов инерциальных датчиков на точность выставки гироскомпаса. *Вестник НИЯУ МИФИ*, 2022, т. 11, № 6, с. 425–441.
<https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.16>
URL: https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/16?locale=ru_RU (дата обращения: 10.03.2025).

- [15] Наумченко В.П., Илюшин П.А., Пикунов Д.Г., Соловьев А.В. Оптимизационный подход к начальной выставке платформенной инерциальной системы при воздействии шумов. *Вестник Московского авиационного института*, 2023, т. 30, № 2, с. 158–168. DOI: 10.34759/vst-2023-2-158-168 URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=174946> (дата обращения: 10.03.2025).
- [16] Наумченко В.П. Зависимость параметров выведения РКН на орбиту от начальной выставки платформенной инерциальной системы. *Вестник Московского авиационного института*, 2024, т. 31, № 4, с. 185–196. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=174946> (дата обращения: 10.03.2025).
- [17] Васильев Ф.П. *Методы оптимизации*: в 2-х кн. Новое изд., перераб. и доп. Москва, МЦНМО, 2011. Кн. 1, 620 с.
- [18] Dvurechensky, P., Shtern, S., Staudigl. First-Order Methods for Convex Optimization. *EURO Journal on Computational Optimization*, 2021, vol. 9, no. 100015, 73 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.00935> URL: <https://arxiv.org/abs/2101.00935> (дата обращения: 10.03.2025).
- [19] Харьков И.А., Шустров А.Д., Селиванова Л.М. Трехкомпонентный дифференциальный вибрационно-струнный акселерометр. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2003, вып. 4, с. 120–125. URL: <http://vestnikpribor.ru/catalog/bcomm/hidden/400.html> (дата обращения: 10.03.2025).
- [20] Курбатов А.М., Курбатов Р.А., Горячкин А.М. Повышение точности волоконно-оптического гироскопа за счет подавления паразитных эффектов в интегрально-оптических фазовых модуляторах. *Гироскопия и навигация*, 2019, т. 27, № 2, с. 52–69. DOI: 10.17285/0869-7035.2019.27.2.052-069 URL: <https://www.elektropribor.spb.ru/nauchnaya-deyatelnost/zhurnal/elektronnaya-versiya/152/1202/> (дата обращения: 10.03.2025).
- [21] *Acutronic Simulation & Test International* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.actidyn.com/en/product/two-and-three-axis-motion-simulators/tri-axis-motion-simulators-st3300-series#productstabs> (дата обращения: 14.11.2024).

Статья поступила в редакцию 09.04.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Наумченко В.П. Расчетно-экспериментальная оценка оптимизационного алгоритма начальной выставки инерциальной платформы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 5. EDN JDMYRY

Наумченко Владислав Павлович — ведущий инженер филиала АО «ЦЭНКИ» — «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова». e-mail: V.Naumchenko@russian.space

Computational experimental assessment of the optimization algorithm for the inertial platform initial alignment

© V.P. Naumchenko

Research Institute of Applied Mechanics named after V.I. Kuznetsov,
Branch of TsENKI JSC, Moscow, 111024, Russian Federation

The paper presents results of the experimental development of a new optimization algorithm for the initial alignment suitable for the platform-class inertial navigation systems (INS) or strap-down inertial navigation systems (SINS) on the rotating base. The author's previous works applied the steepest descent method as a basis in theoretical studies of the concept of constructing an optimization algorithm for the INS initial alignment for space rockets, measurement noise effect on the alignment accuracy and speed, and simulation of the algorithm operation. As part of the final stage of the study, the paper provides results of the algorithm semi-naturalistic simulation for solving the problem of the platform initial alignment. Moreover, separate problems, but no less important from the point of view of their application, are solved. They include leveling a single-axis platform, azimuthal gyrocompassing and alignment of a SINS with the rotating block of sensitive elements around the rotation axis equally deviated from the measurement channels sensitivity axes. A strap-down measurement unit based on the vibration-string accelerometers and fiber-optic gyroscopes is used as the primary measurement device. A three-axis motion simulator is applied to simulate the platform. The obtained results scatter is assessed and compared with the simulation modeling results to confirm the compiled models correctness.

Keywords: strapdown measurement unit, gyro platform, three-axis motion simulator, leveling, gyrocompassing, alignment optimization algorithm, gradient descent method

REFERENCES

- [1] Aleshin B.S., Tyuvin A.V., Chernomorskiy A.I., Plekhanov V.E. *Proektirovanie besplatformennykh inertialnykh navigatsionnykh sistem* [Designing strapdown inertial navigation systems]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2010, 378 p.
- [2] Xu H., Geng D., Fan Z., Wu D., Chen M. An automatic vehicle navigation system based on filters integrating inertial navigation and global. *Positioning Systems. Machines*, 2024, vol. 12, no. 9, 663. <https://doi.org/10.3390/machines12090663> Available at: <https://www.mdpi.com/2075-1702/12/9/663> (accessed March 10, 2025).
- [3] Liang M., Zheng D., Li K., Fang X., Wu G. Application and prospect of strapdown inertial navigation system in coal mining equipment. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 21, 6836. <https://doi.org/10.3390/s24216836> Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/21/6836> (accessed March 10, 2025).
- [4] Sathit P., Chatchapol C., Phansak I. Non-linearity analysis of ship rolls gyro-stabilizer control system. *Sustainable Marine Structures*, 2021, vol. 3, iss. 1, pp. 8–21. <https://doi.org/10.36956/sms.v3i1.316> Available at: <https://journals.nasspublishing.com/index.php/sms/article/view/316> (accessed March 10, 2025).
- [5] Xiaoyu Zhang, Qianjie Liu, Jun Liu, Qingyuan Zhu. Using gyro stabilizer for active anti-rollover control of articulated wheeled loader vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, no. 235 (2), pp. 237–248.

- <https://doi.org/10.1177/0959651820937114>
Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0959651820937114>
(accessed March 10, 2025).
- [6] Krivosheev S.V., Lukin K.O. *Oдноosnyi silovoy gorizontalny gidrostabilizator* [Single-axis horizontal power gyrostabilizer]. Patent RU 2748143 Russian Federation, 2021, bull. No. 14, 10 p.
- [7] Norseev S.A., Burov D.A., Tyutyugin D.Yu. Metody girokompasirovaniya dlya vynosnogo vysokotochnogo girokompasa [Gyrocompassing methods for a high-accuracy remote gyrocompass]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2020, iss. 1, pp. 51–64.
- [8] Feng Sun, Jianzhong Xia, Yueyang Ben, Haiyu Lan. Time-varying parameters based gyrocompass Alignment for marine SINS with large heading misalignment. *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium — PLANS 2014*, pp. 1379–1383. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2014.6851513>
Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6851513> (accessed March 10, 2025).
- [9] Spielvogel A.R., Whitcomb L.L. Adaptive bias and attitude observer on the special orthogonal group for true-north gyrocompass systems: Theory and preliminary results. *The International Journal of Robotics Research*, 2020, vol. 39, iss. 2-3, pp. 321–338. <https://doi.org/10.1177/0278364919881689> Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0278364919881689> (accessed March 10, 2025).
- [10] Jinyong Yang, Guanqin Zhang, Zhe Huang et al. Research on position and orientation measurement method for roadheader based on vision/INS. In: *Proc. SPIE 10621, 2017, International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems*, 2018, vol. 10621, pp. 1062105-1–1062105-12.
- [11] Liu H.Y., Tsai S., Tsai M.L., Chiang K.W. An initial alignment method of inertial navigation system for the static state. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2022, vol. 43, iss. B1–2022, pp. 227–233. Available at: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Volume/10621> (accessed March 10, 2025).
- [12] Jiazhen Lu, Lili Ye, Jong Dong. Applied singular value decomposition method in transfer alignment and bias calibration. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, vol. 14, iss. 5, pp. 700–706. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0397>
Available at: <https://colab.ws/articles/10.1049%2Fiet-rsn.2019.0397> (accessed March 10, 2025).
- [13] Veremeenko K.K., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M., Pronkin A.N. Transferная выставка besplatformennoy inertsiyalnoy navigatsionnoy sistemy: algoritmicheskie osobennosti i chislennyi analiz kharakteristik [Strapdown inertial navigation system transfer alignment: algorithmic features and simulation performance analysis]. *Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2020, no. 4, pp. 57–64.
- [14] Naumchenko V.P., Ilyushin P.A., Pikunov D.G., Solovyev A.V. Otsenka vliyaniya shumov inertsiyalnykh datchikov na tochnosti vystavki giroplatformy [The noises influence estimation of inertial sensors on the accuracy of the gyroscopic platform exhibition]. *Vestnik NIYaU MIFI — Vestnik Natsionalnogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI"*, 2022, vol. 11, no. 6, pp. 425–441. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.16>
Available at: https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/16?locale=ru_RU
(accessed March 10, 2025).

- [15] Naumchenko V.P., Ilyushin P.A., Pikunov D.G., Solovyev A.V. Optimizatsionnyi podkhod k nachalnoy vystavke platformennoy inertsialnoy sistemy pri vozdeystvii shumov [Optimization approach to the platform inertial system alignment under the impact of noise]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 158–168. <https://doi.org/10.34759/vst-2023-2-158-168> Available at: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=174946> (accessed March 10, 2025).
- [16] Naumchenko V.P. Zavisimost parametrov vyvedeniya RKN na orbitu ot nachalnoy vystavki platformennoy inertsialnoy sistemy [Dependence of the space-intended rocket insertion into orbit parameters on the inertial platform system initial alignment]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 4, pp. 185–196. Available at: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=174946>. (accessed March 10, 2025).
- [17] Vasilyev F.P. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. In 2 books. New ed., rev. and enl. Moscow, MTsNMO Publ., 2011, book 1, 620 p.
- [18] Dvurechensky P., Shtern S., Staudigl. First-order methods for convex optimization. *EURO Journal on Computational Optimization*, 2021, vol. 9, no. 100015, 73 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.00935> Available at: <https://arxiv.org/abs/2101.00935> (accessed March 10, 2025).
- [19] Kharkov I.A., Shustrov A.D., Selivanova L.M. Trekhkomponentnyi differentsialnyi vibratsionno-struynyi akselerometr [Three-component differential vibrating-string accelerometer]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2003, iss. 4, pp. 120–125. Available at: <http://vestnikprib.ru/catalog/bcomm/hidden/400.html> (accessed March 10, 2025).
- [20] Kurbatov A.M., Kurbatov R.A., Goryachkin A.M. Povyshenie tochnosti volokonno-opticheskogo giroskopa za schet podavleniya parazitnykh effektov v integralno-opticheskikh fazovykh modulyatorakh [Fiber-optic gyroscope accuracy improvement by suppressing the parasitic effects in integrated optic phase-shift modulators]. *Girokopiya i navigatsiya — Gyroscopy and Navigation*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 52–69. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2019.27.2.052-069> Available at: <https://www.elektropribor.spb.ru/nauchnaya-deyatelnost/zhurnal/elektronnaya-versiya/152/1202>; (accessed March 10, 2025).
- [21] *Acutronic Simulation & Test International* [Electronic resource]. Available at: <https://www.actidyn.com/en/product/two-and-three-axis-motion-simulators/tri-axis-motion-simulators-st3300-series#productstabs> (accessed November 14, 2024).

Naumchenko V.P., Leading Engineer, Research Institute of Applied Mechanics named after V.I. Kuznetsov, Branch of TsENKI JSC. e-mail: V.Naumchenko@russian.space