

| | |
|---|-----------|
| 1. Введение | 1 |
| 2. Модель ошибок БИНС | 2 |
| Ошибки из-за неточного определения вертикали | 2 |
| Ошибки, вызванные дрейфом гироскопов | 4 |
| Ошибки, вызванные погрешностями акселерометров: | 5 |
| 3. Модель ошибок БЧЭ | 6 |
| 4. Методы калибровки БЧЭ | 7 |
| Калибровка поворотами | 7 |
| Калибровка в режиме навигации | 9 |
| 5. Моделирование алгоритма калибровки | 11 |
| 6. Вывод | 13 |
| 7. Список литературы | 14 |

1. Введение

Целью данной работы является изучение алгоритмов калибровки для устранения инструментальных погрешностей БИНС. Задача расчета ошибок заключается в нахождении связи между погрешностями приборов и погрешностями выходных параметров БИНС. Установление такой связи позволяет рассчитать погрешности БИНС, в которой используют элементы с известными характеристиками ошибок. Анализируя ошибки, можно в определенной степени упростить алгоритмы, по которым работает вычислительное устройство, а также выработать обоснованные требования к коррекции БИНС.

2. Модель ошибок БИНС

Определим используемые в докладе системы координат:

- Связанная система координат (ССК) $OX_b Y_b Z_b$ - центр СК совпадает с центром масс объекта, на котором установлен БИНС, ось X_b совпадает с продольной осью объекта, ось Y_b - с нормальной осью, ось Z_b - дополняет правую тройку;
- Географическая система координат (ГСК) $OX_n Y_n Z_n$ - центр СК совпадает с центром масс объекта на этапе выставки, ось X_n направлена на север, ось Z_n - на восток, ось Y_n - вдоль местной вертикали.

Положим, что все значения о линейных ускорениях объекта и его угловых скоростях получаются в ССК, а задача навигации и ориентации решается в ГСК. Ориентация ССК относительно ГСК определяется углами Крылова - крена (γ), тангажа (θ) и курса (ψ).

Ошибки из-за неточного определения вертикали

Пусть ошибки акселерометров и гироскопов равны нулю, а вертикаль в начальный момент времени определена с ошибкой (то есть после этапа выставки ось Y отклонена от местной вертикали на угол β в плоскости YZ ССК). Объект переместился вдоль местной параллели на угол φ относительно начального положения (Рис 1).

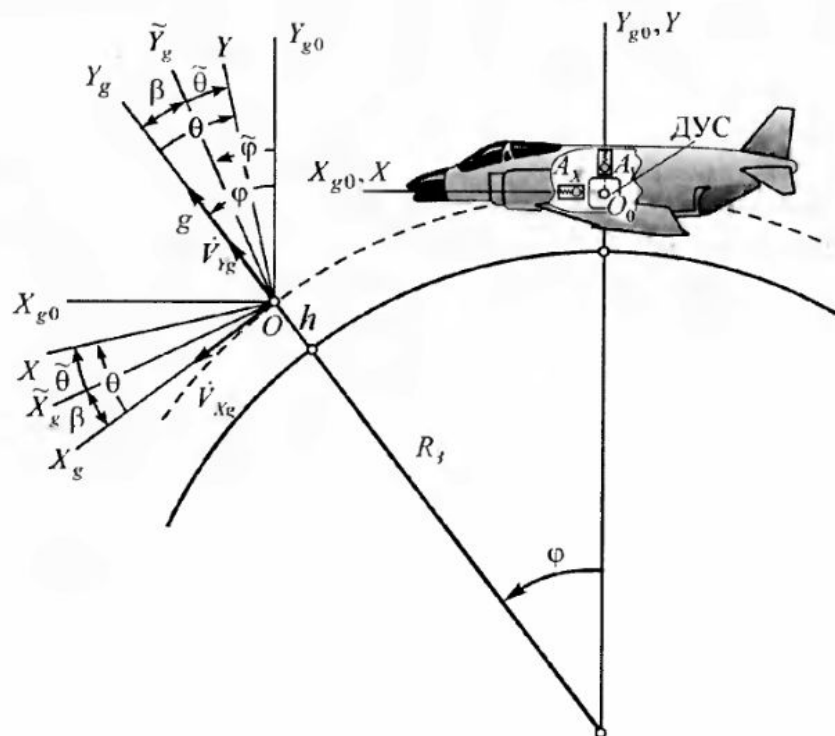


Рис 1. Отклонение оси Y от местной вертикали и перемещение объекта на угол φ .

Тогда акселерометры БИНС по оси X будет измерять следующие проекции векторов линейных скоростей объекта и ускорение силы тяжести:

$$\begin{aligned}n_x^b &= dV_x^b/dt \cos\beta + g\sin\beta; \\n_x^b &= dV_x^b/dt + g\beta;\end{aligned}$$

Таким образом, после перепроектирования вектора линейных ускорений из ССК в ГСК в проекции кажущегося ускорения n_{xg} будет содержаться составляющая вектора ускорения силы тяжести.

Значение угла β можно вычислить, зная истинный угол поворота φ и угол $\hat{\varphi}$ вычисленный с помощью бортового БИНС:

$$\beta = \varphi - \hat{\varphi};$$

Продифференцировав и проинтегрировав обе части равенства получим:

$$\begin{aligned}d\beta/dt &= -\int_0^t g\beta dt; \\d^2\beta/dt^2 + \omega_0^2\beta &= 0;\end{aligned}$$

где $\omega_0 = \sqrt{g/R}$ - частота Шулера. Эту частоту можно трактовать, как частоту малых незатухающих колебаний в поле силы тяжести Земли физического маятника, приведенная длина которого равна расстоянию от центра Земли до объекта, движущегося на высоте h . Числовое значение частоты Шулера равно $1.24 \cdot 10^{-3}$ рад/с, соответственно, период Шулера будет равен $2\pi/\omega_0 = 84.4$ мин.

Если в начальный момент времени $\beta = 0$, $d\beta/dt = 0$, то ошибка построения вертикали равна 0. В случае, когда в начальный момент времени вертикаль задана с ошибкой $\beta = \beta_0$, то решение верхнего уравнения равно:

$$\beta = \beta_0 \cos \omega_0 t;$$

Следовательно, вычисленная вертикаль будет совершать колебания относительно истинной вертикали с периодом Шулера. Найдем ошибку в определении скорости ЛА, как разность между приборной скоростью и истинной скоростью ЛА, и ошибку определения широты:

$$\begin{aligned}\Delta V_x^n &= g \int_0^t \beta_0 \cos \omega_0 t = \beta_0 g \sin \omega_0 t / \omega_0; \\ \Delta \varphi &= \int_0^t (\Delta d\varphi/dt) dt = \beta_0 (1 - \cos \omega_0 t);\end{aligned}$$

Таким образом, ошибки, возникающие при отклонении вычисляемой БИНСом вертикали от истинной, имеют колебательный характер, период которых равен периоду колебаний Шулера, а амплитуда определяется величиной отклонения вертикалей.

Ошибки, вызванные дрейфом гироскопов

Пусть выставка прошла идеально, углы рассогласования между осями ССК и ГСК в начальный момент времени равны 0, акселерометры не имеют ошибок, однако гироскопы измеряют угловую скорость ЛА с ошибкой ε . Найдем ошибку определения угла тангажа θ при движении ЛА в соответствии с *Рис 1*.

Запишем формулу определения θ с учетом дрейфа ε :

$$\theta = \int_0^t (\omega_z^b + \varepsilon - \omega_z^n) dt + \theta_0;$$

Получим ошибку определения θ , вычтя из расчетного значения истинное:

$$\Delta\theta = \int_0^t (\omega_z^b + \varepsilon - \omega_z^n) dt + \theta_0 - \int_0^t (\omega_z^b - \omega_z^n) dt + \theta_0 = \int_0^t (\varepsilon - \Delta\omega) dt;$$

где $\Delta\omega = \omega_z^b - \omega_z^n$. Дифференцируя обе части равенства получим:

$$d\Delta\theta/dt = \varepsilon - \Delta\omega$$

В соответствии с *Рис. 1* связь между истинным и вычисленным значениями угла тангажа определяется равенством:

$$\theta_{\text{вычисленное}} - \theta_{\text{истинное}} = \Delta\theta = -\beta;$$

Таким образом, ошибка выработки тангажа равна ошибке построения вертикали с обратным знаком. Найдем уравнение для ошибки построения вертикали с учетом дрейфа гироскопа, продифференцировав обе части равенства:

$$\begin{aligned} d\beta/dt &= \Delta\omega - \varepsilon = -\Delta V_x^n/R - \varepsilon; \\ \Delta V_x^n &= \int_0^t g\beta dt \Rightarrow d\beta/dt = -1/R \int_0^t g\beta dt - \varepsilon; \end{aligned}$$

Найдем решение уравнения при условии что $\varepsilon = \text{const}$, а начальные условия нулевые:

$$\beta = -\varepsilon \sin \omega_0 t / \omega_0;$$

Найдем ошибки определения скорости и широты:

$$\begin{aligned} \Delta V_x^n &= \varepsilon R (\cos \omega_0 t - 1); \\ \Delta\varphi &= \varepsilon / \omega_0 (\sin \omega_0 t - \omega_0 t); \end{aligned}$$

Таким образом, вычисленная вертикаль совершает Шулеровские колебания около истинной вертикали с амплитудой ε/ω_0 . При этом в ошибке определения скорости присутствует постоянная составляющая εR , которая приводит к накоплению погрешности при определении параметров навигации.

Ошибки, вызванные погрешностями акселерометров:

Пусть выставка прошла идеально, углы рассогласования между осями ССК и ГСК в начальный момент времени равны 0, гироскопы не имеют ошибок, однако акселерометры имеют ошибки смещения нуля $\delta a_x, \delta a_y$. Тогда акселерометры по осям X и Y будут измерять проекции векторов линейных скоростей ЛА, ускорения свободного падения плюс собственные ошибки:

$$\begin{aligned}n_x^n &= dV_x^b/dt \cos\theta + g\sin\theta + \delta a_x; \\n_y^n &= -dV_y^b/dt \sin\theta + g\cos\theta + \delta a_y;\end{aligned}$$

Перепроектируем вектор кажущегося ускорения из ССК в ГСК, запишем получившееся для оси X значение:

$$\begin{aligned}n_x^n &= dV_x^b/dt + g\beta + \delta a_x(\cos\theta + \beta\sin\theta) - \delta a_y(\sin\theta + \beta\cos\theta) \approx \\&\approx dV_x^b/dt + g\beta + \delta a_x\cos\theta - \delta a_y\sin\theta;\end{aligned}$$

Пренебрегая величинами второго порядка малости (произведения ошибок акселерометров), получим уравнение для ошибки построения вертикали:

$$d\beta/dt = -1/R \int_0^t (g\beta + \delta a_x\cos\theta - \delta a_y\sin\theta) dt;$$

Дифференцируя обе части равенства получим:

$$d^2\beta/dt^2 + \omega_0^2\beta = -(\delta a_x\cos\theta - \delta a_y\sin\theta)/R;$$

Полагая, что угол θ мал и $\delta a_x = \text{const}$, получим решение верхнего уравнения при нулевых начальных условиях:

$$\beta = \delta a_x(\cos\omega_0 t - 1)/g$$

Из решения следует, что погрешности акселерометра вызывают колебания вычисленной вертикали с периодом Шулера относительно смещенного от истинной вертикали положения равновесия на величину $\beta = \delta a_x/g$. Амплитуда колебаний равна ошибке акселерометра в долях ускорения силы тяжести $\delta a_x/g$

Найдем погрешности определения скорости и широты БИНС:

$$\begin{aligned}\Delta V_x^n &= \delta a_x \sin\omega_0 t / \omega_0; \\ \Delta\varphi &= \int_0^t (\Delta V_x^n / R) dt = \delta a_x (1 - \cos\omega_0 t) / g;\end{aligned}$$

Таким образом, ошибка в измерении скорости и широты также имеет колебательный характер с периодом Шулера и амплитудой, пропорциональной значению погрешности акселерометра.

3. Модель ошибок БЧЭ

Как видно из предыдущего блока, ошибки БЧЭ БИНС сильно сказываются на точности решения задач навигации и ориентации. Опишем подробнее эти погрешности. Запишем модель ошибок БЧЭ БИНС - акселерометров и гироскопов:

$$\delta a_x^b = a_x + a_{xx}a_{bx} + a_{xy}a_{by} + a_{xz}a_{bz};$$

$$\delta a_y^b = a_y + a_{yx}a_{bx} + a_{yy}a_{by} + a_{yz}a_{bz};$$

$$\delta a_z^b = a_z + a_{zx}a_{bx} + a_{zy}a_{by} + a_{zz}a_{bz};$$

$$\delta \omega_x^b = \beta_x + \beta_{xx}\omega_{bx} + \beta_{xy}\omega_{by} + \beta_{xz}\omega_{bz} + (\beta_{yxx}a_{bx} + \beta_{xyy}a_{by} + \beta_{xyz}a_{bz})\omega_{by} + (\beta_{xzx}a_{bx} + \beta_{xzy}a_{by} + \beta_{xzz}a_{bz})\omega_{bz};$$

$$\delta \omega_y^b = \beta_y + \beta_{yx}\omega_{bx} + \beta_{yy}\omega_{by} + \beta_{yz}\omega_{bz} + (\beta_{yxx}a_{bx} + \beta_{yxy}a_{by} + \beta_{yzz}a_{bz})\omega_{bx} + (\beta_{yzx}a_{bx} + \beta_{yzy}a_{by} + \beta_{yzz}a_{bz})\omega_{bz};$$

$$\delta \omega_z^b = \beta_z + \beta_{zx}\omega_{bx} + \beta_{zy}\omega_{by} + \beta_{zz}\omega_{bz} + (\beta_{zxx}a_{bx} + \beta_{zxy}a_{by} + \beta_{zyz}a_{bz})\omega_{bx} + (\beta_{zyx}a_{bx} + \beta_{zyy}a_{by} + \beta_{zyz}a_{bz})\omega_{by};$$

где δa_i^b и $\delta \omega_i^b$, ($i = x, y, z$) – проекции ошибок гироскопов и акселерометров в ССК.

a_i – смещение нуля акселерометра.

a_{ii} – масштабный коэффициент акселерометра.

a_{ij} – ошибка выставки акселерометра ($i \neq j$)

a_{bj} – проекции ускорения силы тяжести

β_i – смещение нуля гироскопа

β_{ii} – масштабный коэффициент гироскопа

β_{ij} – ошибка выставки гироскопа ($i \neq j$)

β_{ijk} – дрейф гироскопа, зависящий от ускорений (flexure error)

ω_{ij} – абсолютная угловая скорость в проекции на ССК.

Эти параметры называются коэффициентами модели ошибок БЧЭ БИНС. Для нахождения значений коэффициентов акселерометров необходимо решить 7 линейно независимых уравнений, для определения коэффициентов гироскопов - 10 линейно независимых уравнений.

Для решения данной задачи БЧЭ устанавливают на поворотный стол (стенд) - устройство с n ($n = 1..5$) степенями свободы, которое способно поворачиваться и выставляться вокруг своих осей свободы с высокой точностью (около 1 угловой секунды). Стенд установлен на сейсмически изолированном фундаменте, исключая вибрационные и ударные воздействия на чувствительные элементы БИНС. Часто оси стенда совмещают с осями ГСК.

БЧЭ поворачивают на определенные углы, снимая показания акселерометров и гироскопов, необходимые для решения уравнений. Процесс нахождения и устранения ошибок БЧЭ называют *калибровкой*.

4. Методы калибровки БЧЭ

Под калибровкой понимается совокупность операций, устанавливающих соотношение между измеренными БЧЭ величинами и установленными значениями тех же величин на поворотном стенде. Результатом калибровки является определение коэффициентов модели ошибок чувствительных элементов БИНС.

Калибровка поворотами

Пусть оси поворотного стенда совмещены с осями ГСК с точностью до ошибки стенда, а БЧЭ расположен следующим образом, относительно осей поворотного стенда (Рис 2):

$$X_b = E, Y_b = N, Z_b = Up$$

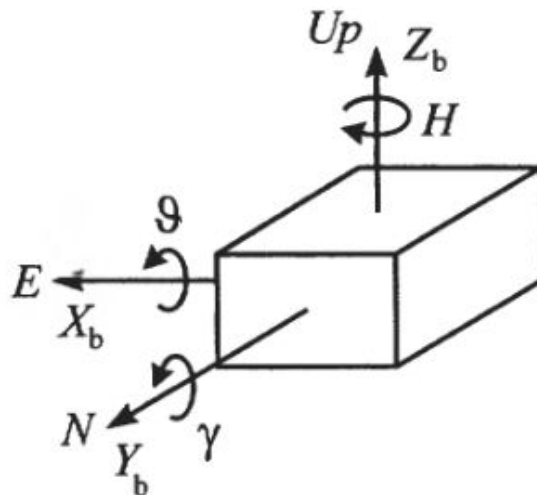


Рис. 2: положение осей ССК относительно ГСК на поворотном стенде.

Проекции скорости вращения Земли и ускорения силы тяжести на БЧЭ:

$$\omega_x^b = 0, \omega_y^b = U \cos \varphi, \omega_z^b = U \sin \varphi$$

$$a_x^b = 0, a_y^b = 0, a_z^b = g$$

В таком положении БЧЭ будет измерять следующие значения:

$$z(a_x) = a_x + a_{xz}g$$

$$z(a_y) = a_y + a_{yz}g$$

$$z(a_z) = a_z + a_{zz}g + g$$

$$z(\omega_x) = \beta_x + \beta_{xy}U \cos \varphi + \beta_{zz}U \sin \varphi$$

$$z(\omega_y) = \beta_y + \beta_{yy}U \cos \varphi + \beta_{yz}U \sin \varphi + U \cos \varphi$$

$$z(\omega_z) = \beta_z + \beta_{zy}U \cos \varphi + \beta_{zz}U \sin \varphi + U \sin \varphi$$

Повернем стенд, а в месте с ним и БЧЭ, на угол $\gamma = 90^\circ$ вокруг оси $N (Y_b)$, тогда положение осей ССК относительно осей поворотного стенда и показания приборов будут следующими:

$$\begin{aligned} X_b &= -Up, Y_b = N, Z_b = E \\ \omega_x^b &= -U \sin \varphi, \omega_y^b = U \cos \varphi, \omega_z^b = 0 \\ a_x^b &= -g, a_y^b = 0, a_z^b = 0 \end{aligned}$$

В таком положении показания БЧЭ будут следующими:

$$\begin{aligned} z(a_x) &= a_x - a_{xx}g - g \\ z(a_y) &= a_y - a_{yz}g \\ z(a_z) &= a_z - a_{zz}g \\ z(\omega_x) &= \beta_x - \beta_{xx}U \sin \varphi + \beta_{xy}U \cos \varphi - U \sin \varphi \\ z(\omega_y) &= \beta_y + \beta_{yx}U \sin \varphi + \beta_{yy}U \cos \varphi + U \cos \varphi \\ z(\omega_z) &= \beta_z + \beta_{zx}U \sin \varphi + \beta_{zy}U \cos \varphi \end{aligned}$$

Проведя серию таких поворотов мы можем определить коэффициенты модели ошибок БЧЭ, определим для примера значения смещения нуля акселерометров, для этого нам потребуется совершить 5 поворотов вокруг 2-х осей стенда:

Акселерометр X:

1-ое измерение: поворот на угол $\gamma = 90^\circ$: $z_1(a_x) = a_x - a_{xx}g - g$

2-ое измерение: поворот на угол $\gamma = 270^\circ$: $z_2(a_x) = a_x + a_{xx}g + g$

По полученным измерениям вычислим значения масштабного коэффициента и смещения нуля акселерометра соответственно:

$$\begin{aligned} a_x &= (z_1(a_x) + z_2(a_x))/2; \\ a_{xx} &= (z_2(a_x) - z_1(a_x) - 2g)/2g; \end{aligned}$$

Коэффициенты модели для акселерометров Y и Z определяются таким же методом, повороты для измерения значений будут следующими:

Акселерометр Y:

1-ое измерение: поворот на угол $\theta = 90^\circ$: $z_1(a_y) = a_y + a_{yy}g + g$

2-ое измерение: поворот на угол $\theta = 270^\circ$: $z_2(a_y) = a_y - a_{yy}g - g$

Акселерометр Z:

1-ое измерение: начальное положение: $z_1(a_z) = a_z + a_{zz}g + g$

2-ое измерение: поворот на угол $\gamma = 180^\circ$: $z_2(a_z) = a_z - a_{zz}g - g$

Калибровка данным методом имеет 2 недостатка. Первый: из-за малой скорости вращения Земли требуется долго калибровать гироскопы БЧЭ, чтобы вычислить параметры смещения нуля. Второй: высокие требования к точности ориентации осей чувствительных элементов БЧЭ относительно ССК, в противном случае ошибки ориентации влияют на точность калибровки.

Для устранения вышеуказанных недостатков применяется второй метод калибровки.

Калибровка в режиме навигации

Сущность метода заключается в том, что БЧЭ, также, как и в первом методе, поворачивается на различные углы, но на протяжении всего процесса калибровки мы измеряем линейные скорости в режиме навигации.

Запишем упрощенную модель ошибок для линейных скоростей, учитывая что БИНС работает в режиме навигации не больше 2-5 мин:

$$\begin{aligned}\delta dV_E/dt &= -g\Phi_N + \delta a_E; \\ \delta dV_N/dt &= g\Phi_E + \delta a_N; \\ d\Phi_N/dt &= \delta V_E/R + \delta\omega_N; \\ d\Phi_E/dt &= -\delta V_N/R + \delta\omega_E;\end{aligned}$$

Пренебрегая малыми $\delta V_N/R$ и $\delta V_E/R$, запишем:

$$\begin{aligned}\delta dV_E/dt &= -g\Phi_N(0) + \delta a_E - g \int_0^t \delta\omega_N dt; \\ \delta dV_N/dt &= g\Phi_E(0) + \delta a_N + g \int_0^t \delta\omega_E dt;\end{aligned}$$

где $\Phi_N(0)$ и $\Phi_E(0)$ - погрешности выставки горизонта, которые определяются как:

$$\begin{aligned}\Phi_N(0) &= (a_x + a_{xz}g)/g; \\ \Phi_E(0) &= -(a_y + a_{yz}g)/g;\end{aligned}$$

Рассмотрим калибровку данным методом на примере поворота БЧЭ на угол θ . Пренебрегая обеими проекциями вектора вращения Земли, из-за их малости в сравнении с $d\theta/dt$, запишем вектор абсолютного поворота ССК:

$$\omega_b = [d\theta/dt, 0, 0];$$

Так как углы поворота ψ и γ также малы, в сравнении с углом поворота θ , кватернион перехода из ССК в НССК будет иметь следующий вид:

$$\Lambda = \cos(\theta/2) + \sin(\theta/2)i + 0j + 0k;$$

Исходя из уравнения выше, запишем модель ошибок для гироскопов в ССК:

$$\begin{aligned}\delta\omega_x^b &= \beta_x + \beta_{xx}d\theta/dt; \\ \delta\omega_y^b &= \beta_y + \beta_{yx}d\theta/dt; \\ \delta\omega_z^b &= \beta_z + \beta_{zx}d\theta/dt;\end{aligned}$$

Перепроектируем их в ГСК:

$$\begin{aligned}\delta\omega_E &= \delta\omega_x^b; \\ \delta\omega_N &= \delta\omega_y^b \cos - \delta\omega_z^b \sin; \\ \delta\omega_{UP} &= \delta\omega_y^b \sin - \delta\omega_z^b \cos;\end{aligned}$$

Совмещая последние 2 уравнения, получим проекции погрешностей гироскопов на оси ГСК:

$$\begin{aligned}\delta\omega_E &= \beta_x + \beta_{xx}d\theta/dt; \\ \delta\omega_N &= (\beta_y + \beta_{yx}d\theta/dt)\cos - (\beta_z + \beta_{zx}d\theta/dt)\sin;\end{aligned}$$

Прделаем тоже самое с акселерометрами, получив их погрешности в ГСК:

$$\begin{aligned}\delta a_E &= a_x - a_{xy}g\sin\theta - a_{xx}g\cos\theta; \\ \delta a_N &= a_y\cos\theta - a_{yy}g\sin\theta\cos\theta - a_{yz}g\cos^2\theta - a_z\sin\theta - a_{zy}\sin^2\theta - a_{zz}g\cos\theta\sin\theta;\end{aligned}$$

Используя полученные выше уравнения, запишем модель ошибок линейных скоростей, которая будет зависеть от угла поворота:

$$\begin{aligned}dV_E/dt &= -a_{xz}g + a_{xy}g\sin\theta + a_{xz}g\cos\theta - g\beta_y\sin\theta dt/d\theta - g\beta_{yx}\sin\theta - g\beta_z(\cos\theta - 1)dt/d\theta - g\beta_{zx}(\cos\theta - 1); \\ \delta dV_N/dt &= a_y - a_{yz}g + a_y\cos\theta + a_{yy}g\sin\theta\cos\theta + a_{yz}g\cos^2\theta - a_z\sin\theta - a_{zy}\sin^2\theta - a_{zz}g\cos\theta\sin\theta + g\beta_x t + g\beta_{xx}\theta;\end{aligned}$$

Стоит отметить, что полная ошибка по скорости вычисляется как сумма ошибки, полученной при вращении и ошибки, полученной после вращения:

$$\delta V_{\text{полная}} = \delta V_{\text{вращение}} + \delta V_{\text{после вращения}}$$

Данный метод калибровки осуществляется в несколько этапов:

- БИНС устанавливается на поворотный стенд, проводится калибровка поворотами.
- После, система переходит в режим навигации.
- Проводится последовательность поворотов, при этом выходные скорости записываются в файл.
- БИНС выключается и выставляется в исходное положение
- Процедура последовательных поворотов выполняется несколько раз, пока мы не накопим данные, достаточные для нахождения калибровочных параметров.
- Накопленные данные сглаживаются и используются для вычисления коэффициентов. (Для сглаживания может подойти метод наименьших квадратов или фильтр Калмана).

5. Моделирование алгоритма калибровки

В качестве калибруемых чувствительных элементов выберем элементы, использующиеся в курсовом проекте. В качестве инструмента моделирования будем использовать *Matlab*.

Опираясь на параметры ошибок, которые даны в паспортах приборов, смоделируем показания БЧЭ БИНС. Положим, что выставка прошла успешно, оси ССК совпадают с осями ГСК, тогда значения, измеряемые акселерометрами будут моделироваться следующим образом:

$$a_{x,y,z} = g_{x,y,z} \text{ scale_factor}_{x,y,z} + axel_bias_{x,y,z};$$

где *scale_factor* – масштабный коэффициент акселерометров, а *axel_bias* – смещение нуля акселерометра по осям X, Y, Z.

Значения погрешностей выбираются случайно исходя из их диапазона, указанного в паспорте измерительного прибора.

Проведем компенсацию погрешностей акселерометров, моделируя измерения элементов при повороте их на калибровочные углы, как было описано выше в блоке 4.

Запишем в массив измерения акселерометров в разных угловых положениях. Процесс записи длится 2 минуты с частотой 400 Гц:

```
cAx_1(i) = normrnd(-gc * cos(a_calibrating_angenls(1, 1) / 57.3)
* sin(a_calibrating_angenls(1, 2) / 57.3), aSigma) * Ax_true_scale_f +
Ax_true_bias;
cAx_2(i) = normrnd(-gc * cos(a_calibrating_angenls(2, 1) / 57.3)
* sin(a_calibrating_angenls(2, 2) / 57.3), aSigma) * Ax_true_scale_f +
Ax_true_bias;

cAy_1(i) = normrnd(gc * sin(a_calibrating_angenls(3, 1) / 57.3),
aSigma) * Ay_true_scale_f + Ay_true_bias;
cAy_2(i) = normrnd(gc * sin(a_calibrating_angenls(4, 1) / 57.3),
aSigma) * Ay_true_scale_f + Ay_true_bias;

cAz_1(i) = normrnd(gc * cos(a_calibrating_angenls(5, 1) / 57.3)
* cos(a_calibrating_angenls(5, 2) / 57.3), aSigma) * Az_true_scale_f +
Az_true_bias;
cAz_2(i) = normrnd(gc * cos(a_calibrating_angenls(6, 1) / 57.3)
* cos(a_calibrating_angenls(6, 2) / 57.3), aSigma) * Az_true_scale_f +
Az_true_bias;
```

Найдем среднее значение накопленных значений и вычислим погрешности смещения нуля и масштабного коэффициента:

```
% Находим среднее значение измеренных величин g
meanAx1 = mean(cAx_1);
meanAx2 = mean(cAx_2);

meanAy1 = mean(cAy_1);
meanAy2 = mean(cAy_2);

meanAz1 = mean(cAz_1);
meanAz2 = mean(cAz_2);

% Находим смещение нуля и масштабный коэффициент акселерометров
Ax_z_bias = (meanAx1 + meanAx2) / 2;
Ay_z_bias = (meanAy1 + meanAy2) / 2;
Az_z_bias = (meanAz1 + meanAz2) / 2;

Ax_scale_f = (meanAx2 - meanAx1) / 2 / gc;
Ay_scale_f = (meanAy1 - meanAy2) / 2 / gc;
Az_scale_f = (meanAz1 - meanAz2) / 2 / gc;
```

Смоделированные значения и значения, полученные в результате калибровки записываются в файл.

Проведем оценку точности вычисленных значений погрешностей чувствительных элементов. Сравним полученные значения с моделируемыми:

Ошибка калибровки смещения нуля акселерометров:

$$\Delta A_{x_{bias}} = |-0.036512 - (-0.036528)| = 0.000016;$$

$$\Delta A_{y_{bias}} = |0.013336 - 0.013394| = 0.000058;$$

$$\Delta A_{z_{bias}} = |0.033555 - 0.033578| = 0.000023;$$

Ошибка калибровки масштабного коэффициента акселерометров:

$$\Delta A_{x_{scale}} = |1.296743 - 1.296744| = 0.000002$$

$$\Delta A_{y_{scale}} = |1.345784 - 1.345783| = 0.000001$$

$$\Delta A_{z_{scale}} = |1.361265 - 1.361269| = 0.000003$$

Как видно, моделируемые ошибки скомпенсированы с приемлемой точностью.

6. Вывод

В ходе выполнения данной работы мною были описаны модели ошибок БИНС и БЧЭ БИНС, определены влияния погрешностей БЧЭ на решение задач ориентации и навигации, установлен характер погрешностей решений. Также описаны методы калибровки БЧЭ БИНС для определения погрешностей приборов и устранения влияния этих погрешностей на работу алгоритма БИНС.

7. Список литературы

1. O. S. Salychov: Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. BMSTU Press. Moscow, Russia. 2004;
2. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов / Под общ. ред. д.т.н. В. Я. Распопова. "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"", 2009;