[**1. Введение**](#_47b4jb9g0xtv) **1**

[**2. Модель ошибок БИНС**](#_arq0t3pozjeg) **2**

[Ошибки из-за неточного определения вертикали](#_plolt2cylcq8) 2

[Ошибки, вызванные дрейфом гироскопов](#_ot34gv10q17f) 4

[Ошибки, вызванные погрешностями акселерометров:](#_4hmquxno9jgo) 5

[**3. Модель ошибок БЧЭ**](#_upkdninj0r03) **6**

[**4. Методы калибровки БЧЭ**](#_xofqhkxitnp4) **7**

[Калибровка поворотами](#_kq7owtnc13f3) 7

[Калибровка в режиме навигации](#_uke8nyt8k35y) 9

[**5. Моделирование алгоритма калибровки**](#_w2lm4ihd78nz) **11**

[**6. Вывод**](#_wnfc3ila4f7e) **13**

[**7. Список литературы**](#_3v3vsyuxsp42) **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) -* центр СК совпадает с центром масс объекта, на котором установлен БИНС, ось совпадает с продольной осью объекта, ось - с нормальной осью, ось - дополняет правую тройку;
* Географическая система координат (ГСК) - центр СК совпадает с центром масс объекта на этапе выставки, ось направлена на север, ось - на восток, ось - 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 раны нулю, а вертикаль в начальный момент времени определена с ошибкой (то есть после этапа выставки ось отклонена от местной вертикали на угол в плоскости *ССК*). Объект переместился вдоль местной параллели на угол относительно начального положения (Рис 1).

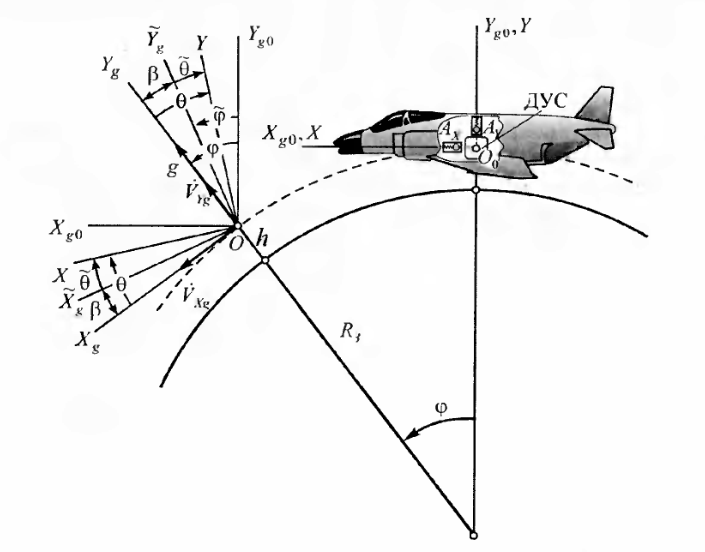


Рис 1. Отклонение осиот местной вертикали и перемещение объекта на угол .

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

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

Значение угла можно вычислить, зная истинный угол поворота и угол вычисленный с помощью бортового БИНС:

Продифференцировав и проинтегрировав обе части равенства получим:

где - 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 . Числовое значение частоты Шулера равно , соответственно, период Шулера будет равен

Если в начальный момент времени , то ошибка построения вертикали равна 0. В случае, когда в начальный момент времени вертикаль задана с ошибкой , то решение верхнего уравнения равна:

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:

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 . Найдем ошибку определения угла тангажа при движении ЛА в соответствии с *Рис 1.* Запишем формулу определения с учетом дрейфа :

Получим ошибку определения , вычтя из расчетного значения истинное:

где Дифференцируя обе части равенства получим:

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

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:

Найдем решение уравнения при условии что , а начальные условия нулевые:

Найдем ошибки определения скорости и широты:

Таким образом, вычисленная вертикаль совершает Шулеровские колебания около истинной вертикали с амплитудой При этом в ошибке определения скорости присутствует постоянная составляющая , 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 Тогда акселерометры по осям будут измерять проекции векторов линейных скоростей ЛА, ускорения свободного падения плюс собственные ошибки:

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

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

Дифференцируя обе части равенства получим:

Полагая, что угол мал и , получим решение верхнего уравнения при нулевых начальных условиях:

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

Найдем погрешности определения скорости и широты БИНС:

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:

где и проекции ошибок гироскопов и акселерометров в *ССК*.

смещение нуля акселерометра.

масштабный коэффициент акселерометра.

ошибка выставки акселерометра

проекции ускорения силы тяжести

смещение нуля гироскопа

масштабный коэффициент гироскопа

ошибка выставки гироскопа

дрейф гироскопа, зависящий от ускорений (flexure error)

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, исключающем 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):

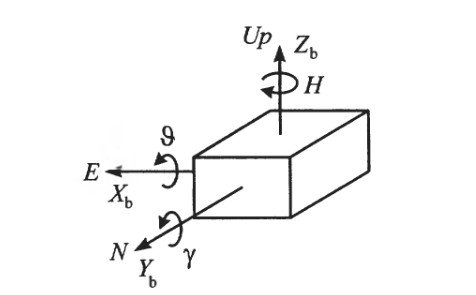


Рис. 2: положение осей ССК относительно ГСК на поворотном стенде.

Проекции скорости вращения Земли и ускорения силы тяжести на БЧЭ:

В таком положении БЧЭ будет измерять следующие значения:

Повернем стенд, а в месте с ним и БЧЭ, на угол вокруг оси , тогда положение осей ССК относительно осей поворотного стенда и показания приборов будут следующими:

В таком положении показания БЧЭ будут следующими:

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

2-ое измерение: поворот на угол

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

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

2-ое измерение: поворот на угол

*Акселерометр Z:*

1-ое измерение: начальное положение:

2-ое измерение: поворот на угол

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:

Пренебрегая малыми и , запишем:

где и - погрешности выставки горизонта, которые определяются как:

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

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

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

Перепроектируем их в ГСК:

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

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

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

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

где масштабный коэффициент акселерометров, а 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 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 накопленные значения 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:

Ошибка калибровки масштабного коэффициента акселерометров:

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. Salychev: 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;