**КАЛИБРОВКА ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ С ОЦЕНКОЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТУ С ПЕРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ БИНС-РТ**

**А.В. Козлов[[1]](#footnote-2), И.Е. Тарыгин[[2]](#footnote-3), А.А. Голован[[3]](#footnote-4)**

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: a.kozlov@navlab.ru

**И.Х. Шаймарданов[[4]](#footnote-5), А.А. Дзуев[[5]](#footnote-6)**

АО "Инерциальные технологии Технокомплекса", Раменское, Россия, e-mail: ilhamzinst@rambler.ru

**Аннотация**

**Ключевые слова**: калибровка, БИНС-РТ, переменная температура

*В работе приводятся результаты применения разработанного ранее метода калибровки бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС), позволяющего проводить калибровочные эксперименты при переменной температуре с одновременной оценкой коэффициентов температурной зависимости, для калибровки БИНС-РТ разработки АО “Инерциальные технологии Технокомплекса”. При этом в течение каждого калибровочного эксперимента применяется один и тот же стандартный алгоритм оценивания (фильтр Калмана), поэтому не требуется строго следовать какой-либо предписанной последовательности операций. Отсутствие строгих требований к проведению калибровочных экспериментов делает метод легко адаптируемым и переносимым на другие модели БИНС и стендового оборудования. Требуется только обеспечить неподвижность системы в начале эксперимента (для стандартной начальной выставки), вращение с угловыми скоростями реального применения БИНС без специальных требований к профилю вращения вокруг каждой приборной оси, приведённой приблизительно к горизонту, а также одновременное изменение температуры, достаточное для существенного проявления температурных зависимостей (в линейной зоне). Применение методики для БИНС-РТ показывает, что калибровку можно проводить при непрерывном изменении температуры в эксплуатационном температурном диапазоне, что вдвое сокращает необходимую продолжительность экспериментов по сравнению со стандартной методикой, требующей ожидания установления температурного режима внутри БИНС в каждой температурной точке.*

**Введение**

Традиционно при калибровке температурных зависимостей параметров модели инструментальных погрешностей блока чувствительных элементов бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) эксперименты проводятся при постоянной температуре в нескольких температурных точках. После получения оценок калибруемых параметров в этих точках, температурная зависимость аппроксимируется какой-либо аналитической функцией, например кубическим полиномом. Для высокоточных навигационных систем авиационного назначения, к которым относится и БИНС-РТ разработки АО "Инерциальные технологии Технокомплекса" (АО ИТТ), необходимая точность калибровки такова, что требование постоянства температуры является существенным: колебания температуры инерциальных датчиков во время эксперимента не должны превышать долей градуса. Одновременно с этим условия эксплуатации таких БИНС подразумевают широкий температурный диапазон, что означает необходимость проводить калибровку в таком же диапазоне температур, т.е. во многих температурных точках.

БИНС авиационного назначения являются достаточно сложными приборными комплексами, включающими вакуумированные объёмы, содержащие чувствительные элементы инерциальных датчиков, а также механическую развязку блока чувствительных элементов от корпуса БИНС на амортизаторах. В связи с этим процессы теплообмена внутри БИНС имеют большие характерные времена. Как следствие, для установления постоянной температуры при температурном переходе обычно требуется несколько часов. И только лишь после установления температурного режима начинаются калибровочные операции, которые длятся примерно такое же время. В результате около половины всего калибровочного цикла составляют температурные переходы, записи которых хотя и могут использоваться для контроля, но не используются для калибровки.

В настоящей работе приводятся результаты применения разработанного ранее метода калибровки БИНС при переменной температуре, апробированного в прошлом для инерциальных блоков низкого класса точности [1], дополненного измерениями точного стенда, исследованными ранее с точки зрения эффективности их применения в калибровке подобного рода на модельных данных [2], для калибровки БИНС-РТ на двухосных испытательных стендах Accutronic в АО ИТТ. В основе метода лежит тот факт, что в случае, когда движение БИНС ограничено только вращением, её ориентацию можно вычислить несколькими способами, а именно по измерениям акселерометров, датчиков угловой скорости и датчиков угла поворота осей стенда.При выполнении достаточно общих требований к профилю вращений каждая систематическая составляющая погрешностей инерциальных датчиков проявляется уникальным образом, что позволяет отделить их друг от друга и определить величину каждой из них при сравнении результатов вычисления ориентации. Преимуществом подобного метода калибровки, помимо отсутствия строгих требований к эксперименту, является единый универсальный алгоритм обработки всего массива данных калибровочного эксперимента (фильтр Калмана), не требующий никаких изменений или подстроек при изменении плана эксперимента или при переходах между различными режимами вращения или изменения температуры. Это преимущество позволяет легко переносить методику между различными БИНС (в пределах одного класса точности) и стендовым оборудованием, задействуя при необходимости дополнительные испытательные стенды, не обязательно обеспечивающие одинаковый план эксперимента. КалибровкаБИНС при переменной температуре приблизительно вдвое сокращает длительность калибровки по сравнению с традиционным подходом, при котором эксперименты проводятся после установления температурного режима внутри БИНС.

**Математические модели задачи калибровки**

Подробное описание используемых математических моделей приведено в [1]. Вводится вектор состояния нестационарной линейной динамической системы с измерениями, содержащий:

* малые погрешности ориентации БИНС;
* постоянные составляющие дрейфа лазерных гироскопов;
* температурные коэффициенты дрейфа лазерных гироскопов;
* постоянные составляющие погрешности нулевого сигнала акселерометров;
* температурные коэффициенты погрешности нулевого сигнала акселерометров;
* постоянные составляющие погрешности масштабных коэффициентов акселерометров;
* температурные коэффициенты погрешностей масштабных коэффициентов акселерометров;
* малые углы перекосов осей чувствительности акселерометров;
* постоянные составляющие погрешности масштабных коэффициентов лазерных гироскопов;
* температурные коэффициенты погрешностей масштабных коэффициентов лазерных гироскопов;
* малые углы перекосов осей чувствительности лазерных гироскопов;
* малые установочные углы несоосности систем координат план-шайбы стенда и БИНС;
* координаты центра вращения в приборных осях, если они неизвестны или требуют уточнения;
* запаздывания между измерениями инерциальных датчиков и стенда, если они неизвестны;
* при необходимости характеристики системы амортизации блока чувствительных элементов.

В пределах одного калибровочного эксперимента температурные зависимости предполагаются линейными. Для вектора состояния имеется линеаризованное модельное уравнение вида

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где— стохастические возмущения, принимаемые некоррелированными гауссовыми белыми шумами известной (по порядку величины) интенсивности, и— матрица, определяющая динамическую модель, большая часть элементов которой являются нулевыми.

В качестве измерений используется разница между модельной удельной силой реакции, измеряемой акселерометрами, в проекциях на оси системы координат, связанной с географической вертикалью, и известной истинной величиной этой силы:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

где — тройка измерений, — модельная матрица ориентации БИНС, полученная по измерениям гироскопов, — тройка измерений акселерометров, — величина местной силы тяжести. При наличии информации от поворотного стенда (как правило, эта информация обновляется реже, чем измерения инерциальных датчиков, и иногда бывает недостоверной из-за рассинхронизации) формируются дополнительные измерения, характеризующие разницу модельной ориентации БИНС и ориентации план-шайбы стенда:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

где — тройка измерений, а  — матрица ориентации, вычисленная по показаниям датчиков углов поворота осей стенда. Оба набора измерений с точностью до слагаемых второго порядка малости и стохастических членов линейно связаны с вектором состояния:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

где , — соответствующие матрицы, а , — стохастические погрешности измерений, которые также, как и  принимаются некоррелированными гауссовыми белыми шумами. Для оценки вектора состояния введённой системы (1–4) используется стандартный в задачах подобного рода алгоритм оценивания — фильтр Калмана, реализованный в численно устойчивом варианте методом корня из ковариационной матрицы.

Для вычисления начальной матрицы ориентации калибровочный эксперимент начинается с интервала неподвижности. Далее следуют последовательные вращения вокруг каждой из приборных осей со скоростями порядка скоростей реального применения БИНС в течение нескольких часов. Каждая из осей при вращении вокруг неё располагается примерно горизонтально. В то же самое время независимо от вращений постепенно изменяется температура в термокамере стенда, что приводит к изменению температуры внутри БИНСна 5–10 градусов. Исследование [3], а также практический опыт показывают, что в таком эксперименте линейная динамическая система является наблюдаемой, и все компоненты вектора состояния оцениваются с приемлемой точностью.

**Результаты калибровки БИНС-РТ при переменной температуре**

В АО ИТТ принята последовательность вращений и профиль изменения температуры БИНС при калибровке, приведённые на графиках ниже. Рис. 1 демонстрирует измерения угловой скорости и термодатчиков блока чувствительных элементов БИНС-РТ во время типичного калибровочного эксперимента с переменной температурой.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1. Профили вращения и изменения температуры внутри БИНС-РТ в калибровке. |

Помимо собственно вращений с горизонтальной осью в каждый цикл также входят короткие статические интервалы в различных положениях, и только на этих интервалах показания датчиков углов поворота осей стенда являются достоверными из-за асинхронности канала передачи информации между регистрирующей аппаратурой и стендом Accutronic.

Температурные зависимости параметров лазерных гироскопов БИНС-РТ близки к нулю, инаиболее значительными являются температурные вариации сигналов акселерометров. На Рис. 2 приведены результаты калибровки температурных зависимостей параметров акселерометров.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2. Результаты калибровки температурных вариаций параметров акселерометров по экспериментам с переменной температурой в шести температурных диапазонах. Пунктиром даны модельные линейные температурные зависимости, соответствующие оценкам температурных коэффициентов в каждом из экспериментов, и оценки 1-интервалов для них. |

Из приведённых графиков следует, что оценки температурных коэффициентов соответствуют реальным температурным зависимостям, а выбранные температурные диапазоны соответствуют линейным моделям температурной зависимости. Дальнейшие испытания БИНС показывают, что после калибровки величина погрешности измерений составляет менее 0.01 град/час для лазерных гироскопов и 2∙10−4 м/сек2 для акселерометров, что соответствует классу точности системы.

**Выводы**

Результаты калибровки БИНС-РТ предложенным методом [1], [2] подтверждают возможность его применения для навигационных систем инерциального класса точности в экспериментах с переменной температурой. При этом рабочий температурный диапазон целесообразно разделить на участки с перепадом температуры внутри БИНС порядка 5–10 градусов. В этом случае с одной стороны температурные зависимости проявляются достаточно заметно для оценки температурных коэффициентов, а с другой стороны эти зависимости достаточно близки к линейным.

**Литература**

1. **Козлов А. В., Тарыгин И. Е., Голован А. А.** Калибровка инерциальных измерительных блоков на грубых стендах с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой / XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. – С. 319–322.

2. **Вавилова Н. Б., Голован А. А., Парусников Н. А., Васинёва И. А.** Задача калибровки бескарданных инерциальных навигационных систем на точных стендах / XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2016. – С. 52–55.

3. **Тарыгин, И.Е., Козлов А.В.** Анализ наблюдаемости в задаче калибровки температурных моделей погрешностей инерциальных датчиков авиационной навигационной системы // Труды МАИ. 2016. 89.

1. Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. [↑](#footnote-ref-2)
2. Аспирант. [↑](#footnote-ref-3)
3. Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией. [↑](#footnote-ref-4)
4. Математик 1 категории. [↑](#footnote-ref-5)
5. Математик 2 категории. [↑](#footnote-ref-6)