

О ЗАДАЧЕ ПОВЕРКИ НОСИМОГО РЕГИСТРАТОРА УСКОРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

П.А. Бахметьев, А.П. Кручинина, В.В. Латонов,
Д.С. Матвеев, Б.С. Щавелев, П.А. Кручинин

П.А. Бахметьев; канд. физ.-мат. наук А.П. Кручинина;
канд. физ.-мат. наук, с.н.с. В.В. Латонов; Д.С. Матвеев (МГУ)
Б.С. Щавелев (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)
Канд. физ.-мат. наук, доцент П.А. Кручинин (МГУ)

Обсуждается возможность проверки и корректирующей калибровки носимого регистратора ускорений в условиях орбитального полета. Этот регистратор включает трехкомпонентный акселерометр. Наиболее сложным этапом проверки является определение его масштабных коэффициентов. Основная трудность проверки связана с отсутствием на борту космической станции специального оборудования. Для тестирования акселерометров предполагается использовать штатный измеритель масс, установленный на борту МКС. Рассмотренные в статье алгоритмы используют помимо показаний регистратора данные о движении платформы измерителя масс и обработку записей видеокамеры. Для опробования предложенных алгоритмов в наземных условиях проведены записи, имитирующие ситуацию орбитального полета. Предложенные алгоритмы показали погрешность определения масштабных коэффициентов акселерометров порядка 2 %.

Ключевые слова: блок акселерометров, масштабные коэффициенты, измеритель масс, невесомость, обработка видеоизображений.

On the Problem of Testing a Portable Acceleration Recorder under Orbital Flight Conditions. P.A. Bakhmetiev, A.P. Kruchinina, V.V. Latonov, D.S. Matveev, B.S. Shchhavelev, P.A. Kruchinin

The paper discusses the possibility of testing and correcting calibration of a portable acceleration recorder under orbital flight conditions. This recorder includes a 3-axis accelerometer. The most difficult stage of calibration tests is the determination of its scale factors. The main difficulty of calibration is the lack of special equipment on the space station. It is proposed to use a standard mass meter installed on the ISS for testing accelerometers. The algorithms considered in the paper use data of the motion of the mass meter platform and the video camera records processing in addition to the recorder readings. For testing the algorithms under earth conditions, recordings were made that simulate conditions of an orbital flight. The proposed algorithms showed 2 % error in determining the scale factors of the accelerometers.

Keywords: accelerometers unit, scale factors, calibration, mass meter, weightlessness, video image processing.

Изучение организации восприятия человеком информации и процесса формирования вестибулярных откликов в условиях орбитального полета представляет значительный интерес. Важным «поставщиком информации» о движении головы человека является вестибулярная система. Вестибулярная система обладает чувствительностью к величине и направлению линейных и угловых ускорений. Вестибулярные нейронные центры связаны со многими отделами нервной системы, в частности с группами нейронов отвечающих за управление поворотами глазных яблок. А точные движения глаз, обеспечивающие стабилизацию изображения на сетчатке – необходимое условие для видения и зрительного восприятия.

При нарушениях в вестибулярной системе возникают необычные движения глаз. Условия орбитального полета также инициируют изменения глазодвигательного поведения при зрительном слежении за стимулами [1]. При исследовании управления зрительной системой для произвольных движений задача усложняется необходимостью отслеживать изменения положения головы. Более того, система отслеживания должна отвечать нескольким требованиям: точность, простота использования, автономность, малые габариты. Для отслеживания поворотов головы в условиях орбитального полета ранее уже использовались инерциальные датчики [2]. Инерциальный блок включает трехосные микромеханические акселерометр и датчик угловой скорости. По критериям компактности, автономности и удобству использования в условиях орбитальной станции такой выбор представляется на данный момент выигрышным решением. Более того, возможная высокая частота получения данных позволяет их рассматривать как основной элемент для получения информации для создания корректоров вестибулярной системы [3].

Вместе с тем инерциальные датчики обладают рядом недостатков, таких, как дрейфы, накопление ошибок разного рода. В связи с этим для получения достоверной информации об ускорениях движения головы космонавтов в условиях орбитального полета на протяжении длительного времени необходимо иметь возможность проверки датчика. Необходимость этого подтверждает следующий пример.

В космическом эксперименте «ETD» [4] регистрировались движения глаз, три проекции линейного ускорения и три проекции угловых скоростей. Записи с акселерометра и датчиков угловых скоростей (ДУС), полученные в ходе эксперимента «ETD», предоставлены Институтом медико-биологических проблем РАН. Во время записи космонавт совершал повороты головы в сагиттальной и трансверсальной плоскостях. Для вращательного движения вектор ускорения ортогонален вектору угловых скоростей. В этом случае квадрат модуля ускорения a чувствительной массы акселерометра определяется соотношением

$$a^2 = \rho^2(\dot{\omega}^2 + \omega^4).$$

Здесь ω – модуль вектора угловой скорости вращения прибора, а ρ – расстояние от чувствительной массы акселерометра до оси вращения. Для набора поворотов восстанавливалось расстояние ρ . В начальных сессиях значение данной величины оценивалось величинами порядка 10 сантиметров, что, соответствует имеющимся данным о взаимном расположении оси поворота головы и инерциальных датчиков. Для последних сессий, выполненных через несколько лет после начала эксперимента, данное значение изменилось и превысило значения в несколько метров. Такой эффект может иметь несколько причин. Среди прочих вероятное изменение масштабных коэффициентов в силу специфических условий орбитального полета.

В подобной ситуации, когда необходимо исключить недостоверность полученных данных, авторами предлагается метод поверки калибровочных коэффициентов инерциального датчика в условиях орбитального полета. Данный метод может быть применен при продолжении космического эксперимента «Изучение особенностей вестибулярной стимуляции в невесомости» [5, 6], выполняемого на борту МКС. Для списания нулей носимого регистратора ускорений (НРУ) достаточно закрепить его неподвижно относительно корпуса МКС. Так как ускорения и угловые скорости станции существенно ниже погрешности измерения прибора, то показания НРУ в этом положении можно использовать в качестве нулевых показаний акселерометров и ДУС'ов. Поверку масштабных коэффициентов датчиков угловой скорости можно проводить стандартными методами [7]. Поверка масштабных коэффициентов акселерометров в условиях орбитального полета представляет собой нетривиальную задачу. Измерением акселерометра (ньютонметра) является удельная сила, удерживающая его чувствительную массу «неподвижно» относительно корпуса прибора. Показания прибора, покоящегося на поверхности Земли, определяются проекцией силы тяжести на ось чувствительности прибора. Процедура стандартной наземной калибровки [8, 9] опирается на знание удельной силы тяжести в месте ее проведения. В условиях орбитального полета удельная сила тяжести скомпенсирована центробежной силой, и применение данного метода в условиях орбитального полета оказывается невозможным.

Одна из значительных проблем заключается в отсутствии на борту штатного оборудования для такой поверки. В связи с этим представляет интерес не только разработка алгоритмов поверки, но и вопрос о точности, с которой эту поверку удастся осуществить с использованием имеющегося на борту оборудования.

Один из вариантов возможной поверки и калибровки регистратора ускорений в космосе состоит в организации движения прибора относительно станции по заданному закону. Для этого предлагается использовать прибор для измерения масс [10], который представляет собой пружинный осциллятор, совершающий свободные колебания относительно орбитальной станции. В настоящее время нельзя считать, что все необходимые параметры

движения измерителя известны с необходимой точностью. В связи с этим помимо варианта калибровки регистратора ускорений, использующего только информацию о движении платформы измерителя масс, рассмотрен вариант, использующий возможности обработки изображения видекамеры.

Постановка задачи и используемое оборудование

Целью исследования является разработка методики поверки масштабных коэффициентов носимого регистратора ускорений при помощи измерителя масс – прибора для определения массы на борту космической станции. Это требует апробации методики и входящих в нее алгоритмов в наземных условиях. Для наземной апробации использовались:

1. Носимый регистратор ускорений (НРУ) ВЕКТОР-МБИ-1 (рис. 1, 2), жестко закрепленный внутри специального корпуса с ортогональными гранями, который содержит набор светодиодов, показанных на рис. 2. Данное устройство представляет из себя инерциальный датчик, включающий 3-компонентный акселерометр с возможностью проводить автономную запись.



Рис. 1. Носимый регистратор ускорений ВЕКТОР-МБИ-1



Рис. 2. Корпус для регистратора ускорений

2. Измеритель масс (ИМ) – прибор для измерения массы в невесомости. Данный прибор использует информацию о зависимости периода гармонического осциллятора от массы закрепленного на нем тела. ИМ представляет собой неподвижный стенд, на котором расположен упругий элемент в направляющих. К концу этого упругого элемента крепится платформа для размещения «взвешиваемого» груза (рис. 3). Затем платформу располагают в положении, при котором деформация упругого элемента максимальна, и фиксируют магнитным замком. Таким образом, начальное отклонение колеблющейся массы фиксировано. По сигналу магнитный замок выключается, и платформа начинает совершать свободные поступательные колебания вдоль оси пружины. Информацию об этих колебаниях используют для «взвешивания».



Рис. 3. Измеритель масс с закрепленным ИРУ

Эти колебания предлагается использовать для поверки значений масштабных коэффициентов акселерометров ИРУ. Поверку можно осуществлять как автономно, используя показания инерциального блока и информацию о паспортных данных измерителя масс, так и с использованием дополнительной информации, например, результатов видеосъемки колебаний. Оценка возможностей реализации различных модификаций алгоритмов и определение возможной точности определения масштабных коэффициентов потребовала имитации процедуры поверки в наземных условиях.

Имитационное моделирование поверки акселерометров ИРУ в условиях гравитации

Для наземной отработки алгоритмов поверки акселерометров ИРУ в Центре подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина на измерителе массы из состава комплекса медицинской аппаратуры КМА-01 (заводской номер № 4), используемом для обучения космонавтов, проведены пробные записи показаний ИРУ.

Перед проведением процедуры ось, вдоль которой совершаются поступательные движения подвижной части измерителя масс, горизонтировалась. Таким образом, в ходе эксперимента вектор удельной силы тяжести был приближенно перпендикулярен оси, вдоль которой совершались колебания. Колебания фиксировались видеокамерой Canon EOS335. Линия визирования камеры располагалась ортогонально направлению движения. Расположение камеры выбиралось таким образом, чтобы ИРУ при колебаниях не покидал кадра.

В ходе проведения эксперимента инерциальный датчик, помещенный в корпус, закреплялся в трех различных взаимно ортогональных положениях таким образом, чтобы для каждого из положений ось чувствительности одного из акселерометров была коллинеарна направлению колебаний подвижной части НРУ. После этого для каждого из положений НРУ проводилось стандартное включение измерителя масс.

Перед каждым «взвешиванием» датчик оставался некоторое время в положении покоя. На этом временном интервале показаниями акселерометров НРУ являлась разность смещений нулей и проекций удельной силы тяжести g на оси чувствительности прибора. Таким образом, вычитая средние значения показаний акселерометров в состоянии покоя из показаний акселерометров в процессе измерений, имитируются показания акселерометров со списанными нулями в состоянии невесомости. Характерный вид получаемых данных приведен на рис. 4.

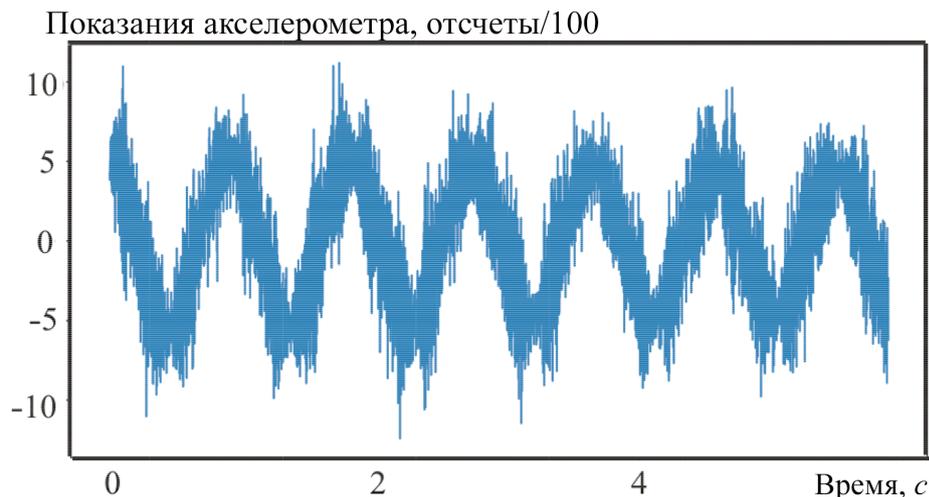


Рис. 4. Имитация показаний акселерометра в невесомости

Анализ спектров мощности всех компонент акселерометров НРУ показал, что частота первого пика колебаний около 1 Гц соответствует колебаниям измерителя масс, используемым при поверке. Прочие упругие колебания конструкции проявляются на высоких частотах и их интенсивность меньше интенсивности полезного сигнала. Кроме полезного сигнала на частоте около 1 Гц на промежутке от 0 до 30 Гц не возникает никаких значимых колебаний. Отношения величин первых пиков для показаний различных компонент акселерометров также позволяют косвенно оценить неколлинеарность оси тестируемого акселерометра и направления движения, которая не превышала нескольких градусов. Проведенный анализ позволяет рассчитывать на то, что погрешность оценивания параметров акселерометра составит

величины порядка первых процентов. В дальнейшем для подавления высокочастотных составляющих использовались данные, сглаженные окном Ханна шириной $1/30$ с, показанные на рис. 5. В условиях МКС сигнал акселерометра будет содержать также шумы, наведенные работающими агрегатами станции. Анализ этих шумов может потребовать усовершенствования алгоритмов сглаживания.

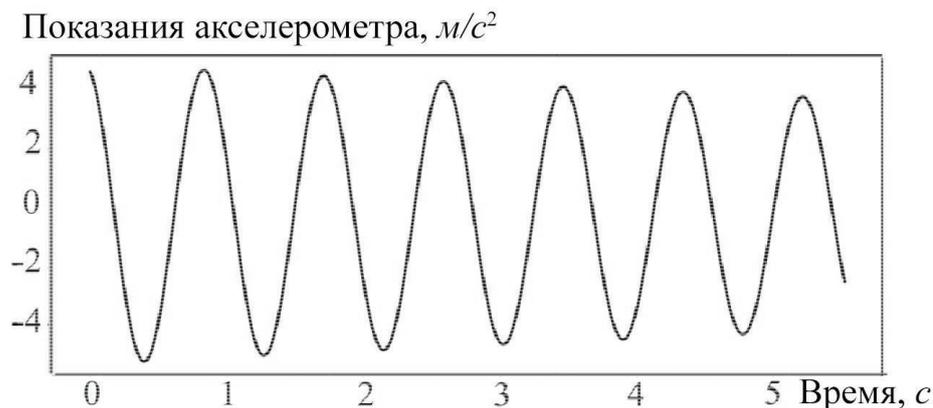


Рис. 5. Сглаженные показания акселерометра

Предварительная обработка видеозображения

В результате пробных наземных испытаний получены видеозаписи, которые обрабатывались при помощи библиотеки OpenCV для Python.

Алгоритм отслеживания положения светодиодов в кадре включал следующие этапы:

1. Для каждого кадра проводилась фильтрация цветов так, чтобы в кадре по возможности остались только области со светящимися синими светодиодами.
2. Для каждой такой области определялся контур в виде окружности с определенным центром и радиусом.
3. Координаты r_n центра контура в кадре с номером n принимались за координаты центра изображения светодиода.
4. Координаты r_{n+1} центра светодиода на очередном кадре ставились в соответствие координатам r_n светодиода на предшествующем кадре в том случае, если они принадлежали прямоугольнику с центром r_n .
5. По значениям координат r_n с использованием калибровочного множителя рассчитывались перемещения x_n подвижной части измерителя масс.

Пример полученных оценок координат одного из светодиодов приведен на рис. 6.

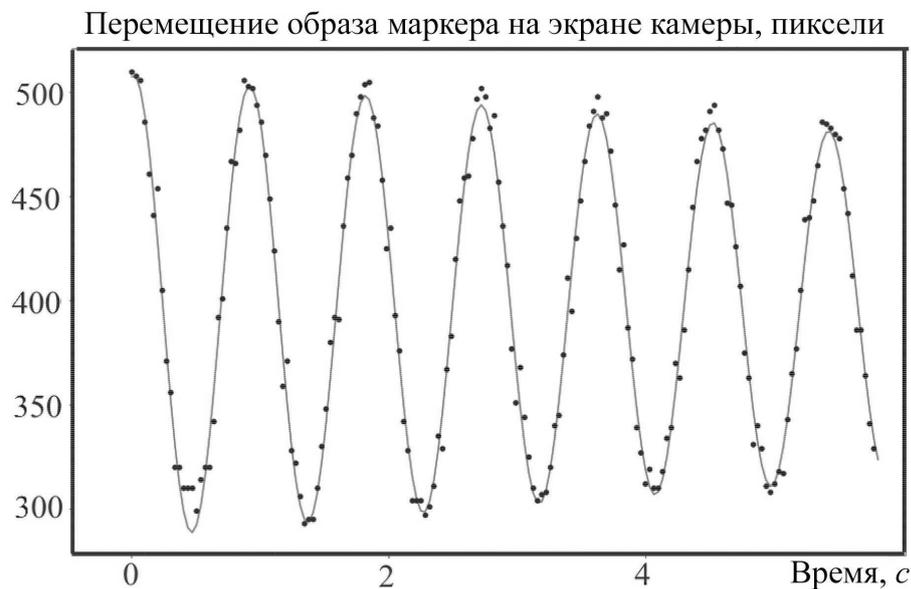


Рис. 6. Оценки координат подвижной части измерителя масс в результате обработки OpenCV.

Точками отмечены координаты изображений маркеров, сплошной линией – аппроксимация траектории

Для дальнейшего использования данных видеонализа аппроксимируем полученные координаты для того, чтобы сгладить составляющие погрешностей.

Будем полагать, что движение платформы измерителя масс представляет собой свободные колебания системы с одной степенью свободы при наличии вязкого трения. Возможным присутствием сухого трения на этом этапе будем пренебрегать. В соответствии с этим аппроксимируем измерения координат маркеров видеонализа функцией вида:

$$x = A_x e^{\varepsilon t} \cos(\omega t + \varphi) + h. \quad (1)$$

Здесь ω – круговая частота колебаний, ε – коэффициент затухания, A_x – «начальная» амплитуда, φ – фазовый угол, h – величина смещения. Для каждого движения параметры A_x , ε , ω , φ , h определялись в пакете Python нелинейным методом наименьших квадратов [10].

Значения ускорения маркеров с использованием параметров функции аппроксимации вычислялись в виде

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = A_x e^{\varepsilon t} (\varepsilon^2 - \omega^2) \cos(\omega t + \varphi) - 2A_x e^{\varepsilon t} \varepsilon \omega \sin(\omega t + \varphi). \quad (2)$$

Грубая оценка масштабных коэффициентов

Самый простой алгоритм оценки масштабных коэффициентов основывается на предположении об отсутствии затухания в системе ($\varepsilon = 0$). В этом случае для оценки масштабного коэффициента s использовалось отношение

$$s = \frac{A_x \omega^2}{A_{fx}}. \quad (3)$$

Здесь A_{fx} – амплитуда изменения показаний акселерометра, A_x – амплитуда колебаний платформы измерителя массы, ω – частота колебаний.

Для грубой оценки амплитуды A_x можно использовать как величину начального отклонения платформы измерителя массы, так и данные обработки изображения видеокамеры.

Использование такой процедуры содержит заметные погрешности в связи со следующими обстоятельствами:

- колебания являются затухающими. Вследствие этого амплитуда колебаний со временем уменьшается, и для приведенной оценки можно использовать только первые волны колебаний;
- первый максимум находится заметно ниже второго. Это означает, что магнитный замок срабатывает не мгновенно, и протяженный во времени процесс заметно искажает оценку по формуле (3).

Результаты

Приведенные особенности движения ограничивают точность оценки масштабных коэффициентов.

1. В случае использования информации о начальном отклонении платформы измерителя масс оценки масштабных коэффициентов отличаются от паспортных значений не более, чем на 4 %.

2. При использовании информации видеокамеры оценки масштабных коэффициентов отличаются от паспортных значений на ± 13 %.

Отметим, что значительные погрешности оценки с использованием видеокамеры вызваны трудностями определения мгновенных значений координат маркеров. Тем не менее, полученные оценки позволяют оценить порядок масштабных коэффициентов, позволяют проводить экспресс анализ результатов тестирования НРУ и оценивать его принципиальную работоспособность.

Для более аккуратного тестирования акселерометра рассмотрим алгоритмы обработки информации, учитывающие особенности динамики измерителя масс.

Алгоритм 1. Использование начального участка траектории и данных о начальном отклонении платформы измерителя ускорений

Первый из рассматриваемых алгоритмов использует только информацию о начальном отклонении A подвижной части измерителя масс и результаты численного интегрирования показаний акселерометра.

Будем полагать известной величину начального отклонения подвижной части измерителя масс относительно положения равновесия. Обозначим через x изменение координаты чувствительной массы акселерометра, отсчитываемой вдоль направления поступательного движения подвижной части измерителя масс. Начало отсчета этой координаты совместим с начальным положением чувствительной массы, при котором подвижная часть измерителя масс удерживается магнитным замком. Уравнения движения чувствительной массы в проекции на ось x в ситуации, когда сила тяжести скомпенсирована силами инерции, имеет вид

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = f, \quad (4)$$

где f – удельная сила, измеряемая акселерометром. В силу выбора начала отсчета движение начинается с нулевыми начальными условиями. Показаниями акселерометра является величина a' , связанная с f соотношением

$$f = sa' + \xi. \quad (5)$$

Здесь ξ – погрешность измерения.

Зависимость координаты x от времени t имеет вид

$$x = \int_0^t \int_0^{\tau_1} f(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1.$$

Эта величина связана с показаниями акселерометра соотношением

$$x = s \int_0^t \int_0^{\tau_1} a' d\tau_2 d\tau_1 + \int_0^t \int_0^{\tau_1} \xi d\tau_2 d\tau_1. \quad (6)$$

Если погрешность измерения центрирована, то она осредняется при интегрировании и оценка \tilde{x} примет вид

$$\tilde{x} = s \int_0^t \int_0^{\tau_1} a' d\tau_2 d\tau_1. \quad (7)$$

Рассмотрим свободные колебания подвижной части измерителя масс. При наличии вязкого трения его движение после прекращения действия магнитных сил представляет собой затухающие колебания в виде (1), где h принимает значение координаты положения равновесия A . В этом случае существует момент времени t_* при котором верны соотношения

$$x(t_*) = A, \quad \frac{d^2 x}{dt^2}(t_*) = 0 \quad (8)$$

и скорость принимает экстремальные (минимальные либо максимальные значения).

Отсюда следует, что масштабный коэффициент s можно оценивать как отношение величины начальной деформации упругого элемента измерителя масс A к оценке \tilde{X} в момент достижения экстремума скорости.

В проведенном тесте остаточная систематическая погрешность показаний акселерометра привела к заметному накоплению возмущений во втором слагаемом формулы (6), что не позволило использовать значения t_* , соответствующие нескольким периодам колебаний. В связи с этим ограничимся рассмотрением начала колебательного процесса. В момент первого прохождения положения равновесия пружинного маятника груз пройдет расстояние, равное A , а накопление ошибки за столь малый промежуток времени будем считать незначительным. Для нахождения первого экстремума скорости воспользуемся аппроксимацией (1). Тогда в соответствии с (7) и (8) получим оценку масштабного коэффициента в виде

$$s = \frac{A}{\int_0^t \int_0^{\tau_1} a' d\tau_2 d\tau_1}.$$

Алгоритм 2. Отыскание масштабных коэффициентов акселерометра по данным видеоанализа

В алгоритме 1 при отыскании масштабных коэффициентов возможны погрешности в информации о начальном положении подвижной части измерителя массы. Поэтому целесообразно проанализировать алгоритм, использующий весь массив данных видеоанализа.

Результаты обработки изображений аппроксимируются функцией вида (1). Для оценивания также используются соотношения (4) и (5).

В качестве неизвестных выбраны следующие параметры: масштабный коэффициент – s , частота колебаний – ω , коэффициент затухания – ε , смещение – φ . Два последних параметра призваны скорректировать масштабную погрешность часов бытовой видеокамеры. Использовались A_x , полученные из аппроксимации данных видеоанализа (1).

Для каждого момента времени определялась разность показаний акселерометра и второй производной функции, аппроксимирующей данные видеоанализа из (2)

$$\Delta = A_x e^{\varepsilon t} (\varepsilon^2 - \omega^2) \cos(\omega t + \varphi) - 2A_x e^{\varepsilon t} \varepsilon \omega \sin(\omega t + \varphi) - sa'$$

Используем алгоритм [11] для минимизации в Python евклидовой нормы Δ . Значения s , ε , ω , φ , при которых достигается этот минимум, используем в качестве оценки.

Результаты обработки пробных записей

Оба алгоритма были опробованы на 6 различных экспериментальных записях. Для каждой пары записей ось одного из акселерометров НРУ устанавливалась параллельно направлению поступательного движения платформы измерителя масс. Полученные масштабные коэффициенты сравнивались со значением, полученным при калибровке прибора производителем.

Полученные в результате работы алгоритма 1 масштабные коэффициенты отличаются от известных не более, чем на 2 %.

Полученные в результате работы алгоритма 2 масштабные коэффициенты отличаются от принятых нами за эталонные не более, чем на 2,7 %.

Если сравнивать алгоритмы с использованием системы видеоанализа, то заметим, что алгоритм 2 имеет существенно большую точность по сравнению с грубой оценкой, использующей данные видеоанализа. Отклонение алгоритма 2 от эталонного значения не превышает 2,7 %, в то время как грубая оценка с использованием системы видеоанализа имеет погрешность в 13,9 %.

Выводы

В работе представлены несколько вариантов поверки калибровочных параметров акселерометра с использованием измерителя масс и видеокамеры в условиях орбитального полета. Предложены алгоритмы отыскания масштабных коэффициентов из отношения амплитуд путем интегрирования показаний датчика и с использованием данных видеоанализа. В тестовой пробе, проведенной в наземных условиях, наилучшие оценки получены для алгоритма с численным интегрированием показаний акселерометров (2 % от паспортных значений). Это может быть вызвано высокой точностью определения начального отклонения подвижной части измерителя масс в лабораторных условиях. В условиях орбитального полета погрешности решения этой задачи могут оказаться существенно выше.

Близкую точность имеет модифицированный метод отыскания масштабных коэффициентов, использующий данные акселерометра и результаты обработки видеозаписи. С его помощью масштабные коэффициенты

были получены с отклонениями не более чем 2,7 % от эталонных значений, что представляется хорошим результатом.

Полученные погрешности определения масштабных коэффициентов значительно больше погрешностей наземной калибровки. Тем не менее, предложенные алгоритмы могут использоваться для грубой бортовой оценки работоспособности акселерометров НРУ для задач [3], так как позволяют скорректировать показания, и при ускорениях порядка g удовлетворяют точности определения ускорения ($\sim 0.02 g$), соответствующей чувствительности вестибулярного аппарата человека [13]. Можно также рассчитывать на то, что предварительная калибровка и юстировка НРУ с определением перекосов осей акселерометров позволят повысить точность поверки прибора.

Авторы благодарят компанию ООО «Медицинские компьютерные системы», г. Зеленоград, за предоставление оборудования, аналогичного научной аппаратуре КЭ.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса»

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kornilova L.N., Naumov I.A., Azarov K.A., Sagalovitch V.N. Gaze Control and Vestibular-Cervical-Ocular Responses After Prolonged Exposure to Microgravity // *Aviation, Space and Environmental Medicine*. – 2012. – Vol. 83. – No 12. – pp. 1123–34.
- [2] Томиловская Е.С., Козловская И.Б. Влияние длительных космических полетов на организацию реакции горизонтальной установки зрения // *Физиология человека*. – 2010. – Т. 36. – № 6. – С. 104–112.
- [3] Исследование возможностей использования гравито-инерциального механорецептора в условиях микрогравитации для детектирования движений космонавта / Александров В.В., Бугров Д.И., Лемак С.С. и др. // Тезисы докладов девятого Международного аэрокосмического конгресса IAC'18. – М., 2018. – С. 129–131.
- [4] ETD (eye tracking device) experiment. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.energia.ru/eng/iss/researches/works-11.html> (дата обращения: 1.07.2021).
- [5] Техническое задание на комплект научной аппаратуры для космического эксперимента «Изучение особенностей вестибулярной стимуляции в невесомости» 140-КГК-06/16, ИМБП РАН, 2016.
- [6] Вектор-МБИ-1. [Электронный ресурс] – URL: https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/?PAGEN_1=3/ (дата обращения: 15.01.2021).
- [7] Болотин Ю.В., Вязьмин В.С. Калибровка инерциального измерительного блока // Спецпрактикум по теоретической и прикладной механике / Под ред. В.В. Александров, Ю.В. Болотин. – М: Изд-во Московского университета, 2019. – С. 119–141.
- [8] Акимов П.А., Деревянкин А.В., Матасов А.И. Гарантирующий подход и L1-аппроксимация в задачах оценивания параметров БИНС при стендовых испытаниях. – М: Изд-во Московского университета, 2012. – 296 с. Ил.
- [9] Вавилова Н.Б., Васинёва И.А., Голован А.А. и др. Калибровка в инерциальной навигации // *Фундамент. и прикл. матем.* – 2018. – Т. 22:2. – С. 89–115.

- [10] Измеритель массы тела в невесомости «ИМ-01М». [Электронный ресурс] – URL: <https://biofizpribor.ru/production/im-01m/> (дата обращения: 1.07.2021).
- [11] Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
- [12] Lagarias J.C., Reeds J.A., Wright M.H., Wright P.E. Convergence Properties of Theelder–mead Simplex Method in Low Dimensions // *SIAM J. Optim.* – 1998. – V. 9. – No 1. – pp. 112–147.
- [13] Бабский Е.Б., Косицкий Г.И., Ходоров Б.И. Физиология человека. Учеб. пособие. – М.: Медицина, 1985. – 544 с.

REFERENCES

- [1] Kornilova L.N., Naumov I.A., Azarov K.A., Sagalovitch V.N. Gaze Control and Vestibular-cervical-ocular Responses After Prolonged Exposure to Microgravity // *Aviation, Space and Environmental Medicine.* –2012. – Vol. 83. – No 12. – pp. 1123–34.
- [2] Tomilovskaya E.S., Kozlovskaya I.B. Effects of Long-term Space Flights on the Organization of the Horizontal Gaze Fixation Reaction // *Human Physiology.* – 2010. – Vol. 36. – No 6. – pp. 104–112.
- [3] Study Into the Feasibility of Using the Gravity-inertial Mechanoreceptor in Microgravity for Detecting a Cosmonaut’s Motions / Aleksandrov V.V., Bugrov D.I., Lemak S.S. et al. // *Abstracts of the 9th International Aerospace Congress IAC’18.* – Moscow, 2018. – pp. 129–131.
- [4] ETD (eye tracking device) experiment. [Electronic source] –URL: <https://www.energia.ru/eng/iss/researches/works-11.html> (accessed date: 1.07.2021).
- [5] Technical Project on a Scientific Equipment Set for the Space Experiment “Study of the Features of Vestibular Stimulation in Zero Gravity” 140-KGK-06/16, IBMP RAS, 2016.
- [6] Vektor-MBI-1. [Electronic source] – URL: https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/?PAGEN_1=3/ (accessed date: 15.01.2021).
- [7] Bolotin Yu.V., Vyazmin V.S. Calibration of the Inertial-measuring Unit // *Special Workshop on Theoretical and Applied Mechanics / Edited by V.V. Aleksandrov, Yu.V. Bolotin.* – М.: Moscow University Press, 2019. – pp. 119–141.
- [8] Akimov P.A., Derevyankin A.V., Matasov A.I. Guarantee Approach and L1-norm Approximation in the Problems of SDINS Parameter Estimation Under Bench Testing (in Russian). — М.: Moscow University Press, 2012. – p. 296. III.
- [9] Vavilova N.B., Vasinyova I.A., Golovan A.A. et al. The Calibration Problem in Inertial Navigation // *Journal of Mathematical Sciences* – 2018. – Vol. 22:2. – pp. 89–115.
- [10] Zero Gravity Body Mass Meter “ИМ-01М”. [Electronic source] – URL: <https://biofizpribor.ru/production/im-01m/> (accessed date: 1.07.2021).
- [11] Gill F., Murray W., Wright M. Practical Optimization. – Moscow: “Mir” Publishing House, 1985. – p. 509.
- [12] Lagarias J.C., Reeds J.A., Wright M.H., Wright P.E. Convergence Properties of Theelder–mead Simplex Method in Low Dimensions // *SIAM J. Optim.* – 1998. – Vol. 9. – No 1. – pp. 112–147.
- [13] Babsky E.B., Kositsky G.I., Khodorov B.I. Human Physiology. Study Guide. – Moscow: “Medicine” Publ., 1985. – p. 544.