

ОБ АЛГОРИТМЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТЕКУЩЕГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПО ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Е.П. Каширская

Рассматривается задача ориентации и навигации, с решением в параметрах Эйлера–Крылова. Проведен анализ входной информации. Реализация алгоритма представлена на экспериментальной телеметрической информации, полученной с бесплатформенной инерциальной навигационной системы, когда на практике информация сильно зашумлена. Унифицированный алгоритм определения параметров ориентации и навигации применен к двум взаимодополняющим участкам движения объекта – стартовому (короткому) и полному. Выводы приведены на основе относительных величин погрешностей между истинными и расчетными значениями параметров ориентации и движения.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, параметры Эйлера–Крылова, телеметрическая измерительная информация.

Введение

Решение задачи определения координат текущего местоположения дает возможность визуального представления движения удаленного подвижного объекта и оперативного экспресс-анализа его технических характеристик. Эта задача является актуальной для любого подвижного объекта: баллистической ракеты, самолета, морского корабля и т. д. В современных телеметрических комплексах уделяется большое внимание определению параметров движения. Поэтому на объект устанавливаются несколько комплектов приборов, производящих аналогичные измерения. Такая необходимость обусловлена полным контролем состояния подвижного объекта, возможностью потери части измерительной информации в процессе передачи, а также выхода из строя измерительных средств. Зачастую объект ограничен массогабаритными и энергетическими характеристиками, и датчикопреобразующая аппаратура вынуждена соответствовать требованиям, уступая, например, в точности.

В связи с этим рассмотрим величины невязок параметров движения, полученные при сравнении значений действительных и рассчитанных традиционным методом решения в параметрах Эйлера–Крылова с датчикопреобразующей аппаратуры невысокой точности на полном и конечном интервалах движения объекта. Работы А.И. Лурье, А.Ю. Ишлинского, В.Н. Бранца, И.П. Шмыглевского, С.М. Онищенко посвящены решению навигационной задачи.

1. Алгоритм решения задачи определения координат текущего местоположения

Рассмотрим подвижный объект, на борту которого установлена бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) с входящими в ее состав измерителями:

- кажущихся ускорений;
- угловых скоростей.

Три акселерометра (на базе емкостного датчика перемещений и магнитоэлектрического обратного преобразователя) предназначены для измерения кажущихся ускорений (в м/с^2), $\mathbf{a}_{\text{каж}}(t) = (a_{\text{каж.}x}, a_{\text{каж.}y}, a_{\text{каж.}z})^T$, $t = [t_0, t_n]$, в частотном диапазоне $0 \div 64$ Гц и в амплитудном диапазоне $\pm 75g$ с погрешностью $0,8\%$ от амплитудного диапазона измерений. Три датчика угловых скоростей (ДУС) (на базе волоконно-оптического гироскопа) предназначены для измерения угловых скоростей (в рад/с), $\boldsymbol{\omega}(t) = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$, $t = [t_0, t_n]$, в частотном диапазоне $0 \div 32$ Гц и ам-

плитудном диапазоне ± 360 градус за секунду с погрешностью 1 % от амплитудного диапазона измерений. Чувствительный элемент каждого датчика сориентирован по одной из осей, связанной с объектом системы координат, с требуемой точностью установки и юстировки.

Опрос датчиков, входящих в состав БИНС, и передача измеренной информации осуществляется бортовой измерительной системой.

Полный поток измерительной информации (полный интервал, $t = [t_0, t_n]$) включает в себя информацию, полученную за несколько секунд до и после старта (t_c) (стартовый участок, $t = [t_0, t_c]$), и до конца передачи информации (конечный участок, $t = [t_c, t_n]$).

Требуется получить погрешности параметров ориентации (ψ, ϑ, γ – углы рыскания, тангажа и крена соответственно), линейной скорости, координат в стартовой системе координат для подвижного объекта на полном интервале $t = [t_0, t_n]$ при известных начальных условиях.

Основной идеей определения координат текущего местоположения является двукратное интегрирование измеренных линейных ускорений с учетом текущего углового положения объекта относительно стартовой системы координат [1–3]. Рассмотрим унифицированный алгоритм решения поставленной задачи:

1. Подготовка измерительной информации БИНС.

Измерительная информация БИНС входит в общий телеметрический поток, передаваемый с подвижного объекта, и является исходной информацией для получения текущих координат объекта. Следует отметить, что на этапе вторичной обработки общего потока необходимо привести все шесть параметров БИНС к единой равномерной шкале времени и исключить влияние на измеренные величины ряда факторов [1, 4], искажающих истинные значения.

2. Вычисление координат местоположения объекта.

Углы поворота, линейная скорость и координаты ПО определяются из основного уравнения инерциальной навигации, путем проецирования его на оси стартовой системы координат: $\mathbf{a}_{\text{каж}}(t) = \mathbf{a}_{\text{абс}}(t) - \mathbf{G}(t)$, где $\mathbf{a}_{\text{абс}}(t)$ – абсолютное ускорение центра масс объекта, $\mathbf{G}(t)$ – вектор силы тяжести, описанный центральным ньютоновским полем. Для описания углового движения объекта используются общеизвестные кинематические уравнения в параметрах Эйлера–Крылова.

2. Результаты вычислительного эксперимента

С целью оценки эффективности использования алгоритма в параметрах Эйлера–Крылова проведены испытания на реальной информации БИНС.

Анализ на соответствие полезных составляющих входных сигналов трех угловых скоростей по осям связанной системы координат характеру действительных значений измеряемых параметров показал удовлетворительный результат. Входные сигналы имеют в своем составе возмущения и ошибки измерения, характеризующиеся величиной дисперсии равной:

– 17,1 (по оси X), 20,7 (по оси Y), 12,5 (по оси Z) для сигналов, полученных с акселерометров;

– 0,03 (по оси X), 0,003 (по оси Y), 0,07 (по оси Z) для сигналов, полученных с датчиков угловых скоростей.

Анализ спектров результатов измерений параметров БИНС также показал наличие зашумленности на частотах выше 40 Гц.

Измерительная информация относится к разряду низкочастотных сигналов, поэтому был применен фильтр низких частот. Фильтрация измерительного сигнала осуществлена двумя способами с частотой среза в 15 Гц [5]:

– рекурсивным (с типом аппроксимации Баттерворта 8-го порядка и неравномерностью в полосе пропускания равной единице);

– нерекурсивным (с типом аппроксимации ряда Фурье, весовым окном Хэмминга, 51-го порядка).

Ошибки, вносимые фильтрами, связаны с непрямоугольностью амплитудно-частотной характеристики и с нелинейностью фазочастотных. Необходимо глубже проанализировать возможности фильтрации для решения поставленной задачи.

При обработке полного участка движения объекта погрешности расчета угла крена достигли 1,6 %, угла тангажа – 9,32 %, угла рыскания – 3,8 %, в связи с быстрым изменением сигнала на стартовом участке, и, следовательно, добавлением постоянной составляющей. На конечном уча-

стке движения объекта погрешность расчета угла крена достигли 1,3 %, угла тангажа – 1,4 %, угла рыскания – 1,7 %. Полученные результаты отображали физическое движение заданного объекта.

Для реализации эксперимента выбрана модель центрального гравитационного поля. На полном участке движения объекта погрешности линейных скоростей составили 10 % (по оси X), 37 % (по оси Y) и 13 % (по оси Z). На коротком участке ошибки достигли 3 % (по оси X), 4 % (по оси Y) и 3 % (по оси Z). Погрешности координат на полном участке движения объекта составили 7 % (по оси X), 4,5 % (по оси Y) и 5 % (по оси Z). На коротком участке ошибки достигли 0,58 % (по оси X), 3,8 % (по оси Y) и 0,1 % (по оси Z). Погрешности значений углов повлияли на погрешности линейных скоростей в стартовой системе координат. Следует отметить, что на коротком участке движения объекта ошибки ниже, так как математической обработке подвергается меньшее число отсчетов и не включается стартовый участок движения с наибольшим количеством сбойных измерений.

Заключение

Рост ошибок расчета параметров движения является следствием накопления погрешностей от сбойной информации. При исключении участков сбойной информации из расчетов достоверность полученных результатов увеличивается. Так как математический аппарат рассчитан на идеальную информацию, то наибольшее влияние на результаты расчетов оказала подготовка измерительной информации в части исключения сбоев, постоянных возмущений и ошибок измерений.

В качестве недостатков метода в параметрах Эйлера – Крылова следует отметить нелинейность кинематических уравнений, а также вырождение при достижении угла тангажа $\pi/2$. Альтернативный метод решения определения текущих координат местоположения объекта может быть основан на параметрах Родрига – Гамильтона, который получает наибольшее распространение в современных задачах навигации. Следует отметить, что кватернионы наиболее употребимы на больших временных участках и при определении ориентации высокоманевренных объектов.

Литература

1. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов; под общ. ред. д-ра техн. наук В.Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. – 280 с.
2. Бранец, В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: Наука: Физматлит, 1992. – 281 с.
3. Ишлинский, А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация / А.Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1976. – 672 с.
4. Современная телеметрия в теории и на практике: учеб. курс / А.В. Назаров, Г.И. Козырев, И.В. Шитов и др. – СПб.: Наука и техника, 2007. – 672 с.
5. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
6. Лурье, А.И. Аналитическая механика / А.И. Лурье – М.: Физматлит, 1961. – 823 с.
7. Онищенко, С.М. Применение гиперкомплексных чисел в теории инерциальной навигации. Автономные системы / С.М. Онищенко. – Киев: Наукова думка, 1983. – 208 с.

Каширская Екатерина Петровна, аспирант кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), инженер ОАО «ГРЦ Макеева»; rechel@mail.ru.

ABOUT ALGORITHM FOR CURRENT POSITION DETERMINATION ON THE BASIS OF TELEMETRIC INFORMATION

E.P. Kashirskay, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
rechel@mail.ru

This paper describes an application of a problem of orientation and navigation in Euler-Krylov's parameters. The analysis of input information was realized. The algorithm was realized by experimental telemetric information. This information was taken a strapdown inertial navigation system. The information is highly noised in practice. The algorithm for determining the parameters of orientation and navigation was applied to starting and full movement sites. Conclusions were based on errors.

Keywords: strapdown inertial navigation system, Euler-Krylov's parameters, telemetric information.

References

1. Matveev B.B., Raspopov B.Y. *Osnovy postroeniya besplatformennykh inertial'nykh navigatsionnykh sistem* [Fundamentals of Strapdown Inertial Navigation Systems Construction]. Saint Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, 2009. 280 p.
2. Branec B.N., Shmiglevsky I.P. *Vvedeniye v teoriyu besplatformennykh inertial'nykh navigatsionnykh sistem* [An Introduction to the Theory of Strapdown Inertial Navigation Systems]. Moscow, Science Fizmatlit, 1992. 281 p.
3. Ishlinskiy A.U. *Orientatsiya, giroskopy i inertial'naya navigatsiya* [The Orientation, Gyroscopes and Inertial Navigation]. Moscow, Science, 1976. 672 p.
4. Nazarov A.B., Kozirev G.I., Shitov I.B. *Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike. Uchebnyy kurs* [The Modern Telemetry in Theory and Practice. The Training Course]. Saint Petersburg, Science and Technics, 2007. 672 p.
5. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. Saint Petersburg, Piter, 2002. 608 p.
6. Lurie A.I. *Analiticheskaya mekhanika* [Analytical Mechanics]. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1961. 823 p.
7. Onishenko S.M. *Primenenie giperkompleksnykh chisel v teorii inertial'noy navigatsii. Avtonomnye sistemy* [Application of the Hypercomplex Numbers in the Theory of Inertial Navigation. Independent Systems]. Kiev, Naukova Thought, 1983. 208 p.

Поступила в редакцию 9 октября 2013 г.