

Таблица 1. Результаты измерений

Наименование	Значение	
	Вынужденные колебания	Автоколебания
Способ возбуждения		
Время разгона, с	3,5	4
Время выбега, с	3	2,5
Амплитуда раскачки, мВ	220	220
Амплитуда установившаяся, мВ	336	240
Частота колебаний, Гц	7518,45	7518,69
Фазовый угол, °	-90	-144

Анализ данных табл. 1 позволяет сделать следующие выводы:

– при автоколебательном режиме резонатор работает на за резонансной частоте, что и определяет уменьшение амплитуды колебаний и увеличение фазы по сравнению с режимом вынужденных колебаний;

– время выбега и разгона в режиме автоколебаний меньше чем в режиме вынужденных колебаний, это приводит к увеличению времени готов-

ности гироскопа в целом и препятствует построению датчика угла с малым временем работы (наличие свободной волны при выбеге).

Проведенное исследование подтверждает вывод, что автоколебательный контур значительно проще и дешевле при реализации, однако простейшая его схема построения не позволяет получить характеристик соответствующих режиму резонансной настройки, т.е. требуется более тщательное исследование и доработка его структуры.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов» (FEWG-2022-0002).

Литература

1. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В. Я. Распопов [и др.] ; под ред. В. Я. Распопова. – Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 189 с.
2. Журавлев, В. Ф. Волновой твердотельный гироскоп / В. Ф. Журавлев, Д. М. Климов. – М.: Наука, 1985. – 125 с.

УДК 531.383

ЗАДАЧА ОРИЕНТАЦИИ В БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Матвеев В.В., Колесникова А.Г., Стрельцов Д.С.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются алгоритмы ориентации бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Дана характеристика кинематических параметров, используемых для описания положения подвижного объекта: углов Эйлера-Крылова, направляющих косинусов, параметров Родрига-Гамильтона, компонентов вектора Эйлера. Приводятся кинематические уравнения, связывающие параметры ориентации и проекции вектора угловой скорости подвижного объекта.

Ключевые слова: кинематические параметры, алгоритм ориентации, бесплатформенная инерциальная навигационная система.

PROBLEM OF ORIENTATION IN STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

Matveev V., Kolesnikova A., Streltsov D.

Tula State University
Tula, Russian Federation

Abstract. Algorithms for orientation of a strapdown inertial navigation system are considered. The characteristic of the kinematic parameters used to describe the position of a moving object is given: Euler-Krylov angles, direction cosines, Rodrigues-Hamilton parameters, components of the Euler vector. Kinematic equations are given that relate the orientation parameters and projections of the angular velocity vector of a moving object.

Key words: kinematic parameters, orientation algorithm, strapdown inertial navigation system.

Адрес для переписки: Матвеев В.В., пр. Ленина, 95, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

Введение. В настоящее время бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) являются наиболее перспективными

системами в тех применениях, где требуется полная автономность, т.е. отсутствие какой-либо связи с внешней средой. Кроме того, в БИНС

отсутствует гиросtabilизированная платформа, обладающая большими габаритами, массой и низкой надежностью, а инерциальные чувствительные элементы устанавливаются непосредственно на борту подвижного объекта. При этом функции гиросtabilизированной платформы выполняет вычислительное устройство, позволяющее алгоритмически пересчитывать показания акселерометров из связанной системы координат в опорную, на основе решения задачи ориентации. Прямым интегрированием получить углы поворота объекта не представляется возможным, так как проекции угловой скорости не являются голономными координатами [1]. Корректный способ определения углов отклонения подвижного объекта относительно опорной системы координат состоит в интегрировании кинематических уравнений относительно искомым параметров ориентации. В качестве параметров ориентации могут служить углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы, параметры Родрига-Гамильтона, вектор конечного поворота и др. От эффективности алгоритмов ориентации зависит точность определения координат местоположения объекта.

Обзору кинематических параметров, используемых для решения задачи ориентации, посвящен настоящий доклад.

Углы Эйлера-Крылова. Три угла: ψ – рыскание, ϑ – тангаж, γ – крен, называемые углами Эйлера-Крылова, описывают положение подвижного объекта относительно опорной системы координат $OX_gY_gZ_g$ (рис. 1). БИНС содержит инерциальный измерительный модуль на трех гироскопах с измерительными осями, направленными вдоль осей связанной с подвижным объектом системы координат $OXYZ$. Каждый гироскоп измеряет одну из трех проекций абсолютной угловой скорости объекта $\omega_x, \omega_y, \omega_z$.

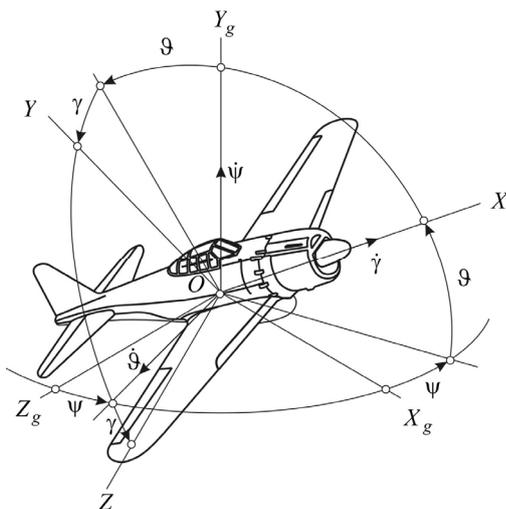


Рисунок 1 – Углы ориентации подвижного объекта

В этом случае углы ориентации могут быть найдены на основе решения трех кинематических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi} &= \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma), \\ \dot{\vartheta} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma, \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - \operatorname{tg} \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Недостатком кинематических уравнений в углах Эйлера-Крылова является наличие особой точки при угле тангажа значением 90° , так как данные углы по сути моделируют некоторый виртуальный карданов подвес, поэтому в англоязычной литературе такой эффект называют «*gimbal lock*» («запирание кардана»).

Направляющие косинусы. Угловое положение подвижного объекта можно задать девятью направляющими косинусами между осями двух систем координат. Алгоритм ориентации с направляющими косинусами основан на решении матричного уравнения Пуассона [2]:

$$\dot{A} = -[\omega \times]A, \quad (2)$$

где $[\omega \times]$ – кососимметрическая матрица, являющаяся матричным эквивалентом векторного произведения и составленная из проекций вектора угловой скорости подвижного объекта, A – матрица направляющих косинусов, характеризующая переход от опорной системы координат к связанной.

После численного решения уравнения (2) осуществляется переход к углам рыскания, тангажа и крена.

Особенностью уравнений (2) является их линейность и определенность для любых углов рыскания, тангажа и крена, т.е. отсутствие эффекта «*gimbal lock*». Недостатком алгоритма является девятый порядок системы (2), что ограничивает его применение.

Параметры Родрига-Гамильтона. Положение подвижного объекта можно задать 4-мя числами q_0, q_1, q_2, q_3 , называемыми параметрами Родрига-Гамильтона [3]. Часто параметры Родрига-Гамильтона рассматривают как элементы кватерниона Q – гиперкомплексного числа, в котором мнимая часть содержит три мнимые единицы. Для кватернионов определена операция умножения, которая подобна матрицам, некоммутативна, но подчиняется свойствам дистрибутивности и ассоциативности.

Кинематическое уравнение в кватернионах имеет вид

$$2\dot{Q} = Q \circ \Omega, \quad (3)$$

где Q – кватернион ориентации, Ω – кватернион, компонентами которого является показания гироскопов, « \circ » – символ произведения кватернионов.

По элементам кватерниона Q восстанавливаются углы рыскания, тангажа и крена. Кинематические уравнения (3) линейные, имеют четвертый порядок и определены для любых значений углов ориентации, что делает их наиболее часто используемых в алгоритмах БИНС.

Вектор Эйлера. Понятие вектора Эйлера связано с одноименной теоремой, согласно которой произвольное вращение твердого тела вокруг неподвижной точки можно осуществить одним поворотом вокруг соответствующим образом избранной оси вращения, проходящей через эту точку. Вектор Эйлера ϕ направлен по оси конечного поворота, а его проекции на оси связанной системы координат определяются через направляющие косинусы оси конечного поворота.

Кинематическое уравнение для вектора Эйлера приближенно имеет вид [4]

$$\dot{\phi} \approx \omega + \frac{1}{2} \phi \times \omega + \frac{1}{12} \phi \times (\phi \times \omega), \quad (4)$$

где ω – вектор угловой скорости подвижного объекта.

Использование вектора Эйлера вместо направляющих косинусов и кватернионов приводит к уменьшению объема вычислений, поскольку вы-

числяется не девять элементов матрицы направляющих косинусов и не четыре параметра Родрига-Гамильтона, а всего три проекции вектора ориентации на измерительные оси. К тому же отпадает необходимость в нормировке составляющих вектора Эйлера в отличие от направляющих косинусов и параметров Родрига-Гамильтона.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоточных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)».

Литература

1. Магнус, К. Гироскоп. Теория и применения / К. Магнус. – М.: Мир, 1974. – 516 с.
2. Бранец, В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1973. – 320 с.
3. Ишлинский, А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация / А. Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1976. – 672 с.
4. Bortz, J. E. A New Mathematical Formulation for Strapdown Inertial Navigation / J. E. Bortz // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 1971. – Vol AES-7, No. 1. – P. 61–66.

УДК 681.5.09

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Мацук А.С., Савкова Е.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлена концепция применения технологий оценки рисков и управления реестром риска на проектируемых и существующих системах автоматизации направленной на повышения надежности систем автоматизации энергетического оборудования.

Ключевые слова: надежность, оценка рисков, система автоматизации, реестр рисков.

METHODS OF INCREASING THE RELIABILITY OF AUTOMATION SYSTEMS OF POWER EQUIPMENT

Matsuk A., Saukova Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The concept of applying risk assessment technologies and risk register management on designed and existing automation systems aimed at improving the reliability of automation systems of power equipment is presented.

Keywords: reliability, risk assessment, automation system, risk register.

Address for correspondence: Matsuk A., lilia karastonova st.17, Minsk 2200689, Republic of Belarus;

Saukova Y., Nezavisimosty av. 65, Minsk 220113, Republic of Belarus

e-mail: 375336759859@yandex.by; savkova@bntu.by

Системы автоматизации энергетических предприятий направлены на обеспечение эффективного выполнения рабочих процессов и их безопасности. К основным видам таких систем относятся релейная защита, противоаварийная

автоматика, автоматизированные системы производства и передачи тепловой и электрической энергии, системы контроля и учета электроэнергии и передача данных с приборов учета тепловой энергии. Несмотря на многообразие выполняе-