DOI 10.25699/SSSB.2019.27.37220

05.13.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОДРИГА-ГАМИЛЬТОНА

И.В. Винокуров
КГУ им. К.Э. Циолковского, г. Калуга

Интегрирование кинематических уравнений в параметрах Родрига-Гамильтона характеризуется асимптотической неустойчивостью. Следствием является существенное накопление погрешности их вычислений при относительном длительном движении автономного подвижного объекта (АПО). Использование нейросетевых принципов организации вычислительно процесса в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) позволит значительно сократить погрешность вычисления их кинематических параметров и, как следствие, повысить эффективность системы управления АПО. В статье исследуется погрешность нейросетевых вычислений кинематических параметров Родрига-Гамильтона для требуемых условий движения АПО. Все вычисления проводятся на нейропроцессоре системы управления АПО.

Ключевые слова: кинематические параметры, искусственные нейронные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления движения АПО по заданной траектории в инерциальной системе координат задаются данные по программному движению его центра масс. В платформенных системах инерциальной навигации эта система координат реализуется гиростабилизированной платформой [1]. В случае БИНС других физически реализуемых координатных систем кроме связанной с АПО системы координат не существует, и все инерциальные системы координат реализуются вычислительным образом. Отсюда в БИНС помимо решения собственно навигационных уравнений обязательно еще и решение кинематических уравнений, т.е. уравнений, определяющих переход от связанной с АПО системы координат к инерциальной и, как следствие, формирующих особенности организации процесса вычисления навигационных параметров АПО, реализуемого в БИНС.

Кинематические уравнения в параметрах Родрига-Гамильтона имеют следующий вид [1]:

$$\frac{d}{dt}\boldsymbol{Y} = \frac{1}{2}\boldsymbol{Y} \times \boldsymbol{W}_E,$$

где $\boldsymbol{Y}$ – кватернион-отображение связанной с АПО системы координат E на его инерциальную систему координат I, $\boldsymbol{W}_E$ – кватернион-отображение угловой скорости вращения АПО на систему координат E.

Решение кинематических уравнений в параметрах Родрига-Гамильтона характеризуется вычислительной неустойчивостью [2]. Иными словами, для этой системы дифференциальных уравнений накопление погрешности вычислений конечно-разностной схемой, адекватной принятому численному методу нахождения её решения, существенно зависит от числа шагов интегрирования. Отсюда для определения кинематических параметров Родрига–Гамильтона с заданной точностью целесообразно использовать относительно большой шаг и, как следствие, достаточно сложные методы интегрирования, обеспечивающие требуемую точность их вычислений при таком шаге. Однако реализация подобных методов на вычислительных устройствах с преобладающей последовательной архитектурой неизбежно приводит к увеличению объёма вычислений и, как следствие, времени нахождения этих параметров АПО.

Искусственные нейронные сети (ИНС), являющиеся основой нейросетевых вычислителей и, как правило, реализующие массовый параллелизм вычислений [3], способны свести время интегрирования системы дифференциальных уравнений любым из существующих методов к минимуму. Эта особенность ИНС дает основание предположить, что использование нейросетевых принципов организации вычислительного процесса позволит за требуемое время определить кинематические параметры Родрига–Гамильтона АПО с заданной точностью.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методика формирования ИНС для интегрирования кинематических уравнений в параметрах Родрига-Гамильтона приведена в [4,5]. Сформированная по этой методике ИНС должна быть использована в системе управления АПО, время движения которого к цели составляет 400 с. Максимальные значения проекций угловой скорости его вращения на оси связанной с ним системы координат при интервале их дискретизации равном 0.01 с. составляют 5.0 рад/с. При этом максимальная абсолютная погрешность вычисления кинематических параметров Родрига–Гамильтона этого АПО для всего времени его движения не должна превышать 0.05%.

Основной задачей является выбор порядка аппроксимации решения системы дифференциальных уравнений на ИНС и величины шага ее интегрирования достаточных для получения заданной точности вычисления параметров ориентации.

На рис. 1 приведены результаты исследования максимальной абсолютной погрешности вычисления кинематических параметров Родрига–Гамильтона при 4-м порядке аппроксимации их решения с шагом интегрирования $h = 2^{-11}, ..., 2^{-5}$.

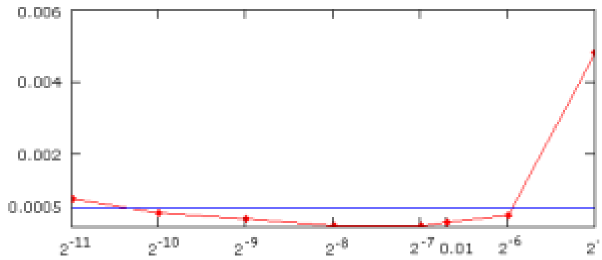

Рис. 1. Максимальные абсолютные погрешности вычислений кинематических параметров Родрига–Гамильтона методом Рунге–Кутта 4-го порядка аппроксимации для шага интегрирования $2^{-11}, \dots, 2^{-5}$ в 32-разрядной ЦА

Из этого рисунка видно, что при величине шага интегрирования, равном 0.001 может быть получена требуемая точность вычисления кинематических параметров Родрига–Гамильтона.

Время интегрирования кинематических уравнений в параметрах Родрига-Гамильтона, в течение которого максимальная абсолютная погрешность вычислений параметров ориентации АПО не превышает заданную, приведено рис. 2.

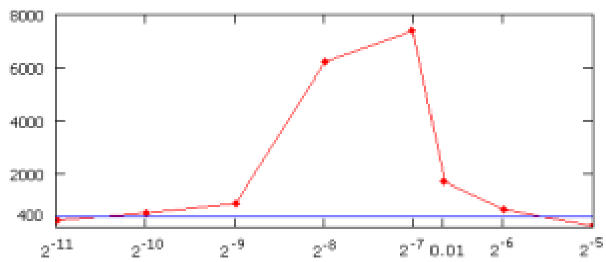

Рис. 2. Время интегрирования кинематических уравнений в параметрах Родрига–Гамильтона методом Рунге–Кутта 4-го порядка аппроксимации для шага интегрирования $2^{-11}, \dots, 2^{-5}$ в 32-разрядной ЦА

Из рис. 2 следует, что для рассматриваемых шага интегрирования и порядка аппроксимации метода Рунге–Кутта погрешность вычислений кинематических параметров Родрига–Гамильтона в 32-разрядной ЦА с точностью, не превышающей заданную, может быть получена в течение как минимум 2000 с.

На рис. 3-6 приведены результаты аналогичных исследований максимальной абсолютной погрешности и времени вычислений кинематических параметров Родрига–Гамильтона методами Рунге-Кутта 3-го и 2-го порядков, в течение которого максимальная абсолютная погрешность их вычислений не превышает заданную. Методы 1-го и выше 4-го порядков не рассматривались.

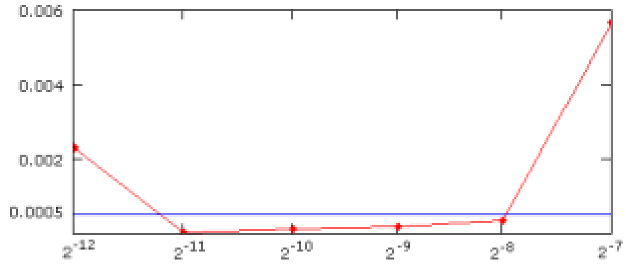

Рис. 3. Максимальные абсолютные погрешности вычислений кинематических параметров Родрига–Гамильтона методом Рунге–Кутта 3-го порядка аппроксимации для шага интегрирования $2^{-12}, \dots, 2^{-7}$ в 32-разрядной ЦА

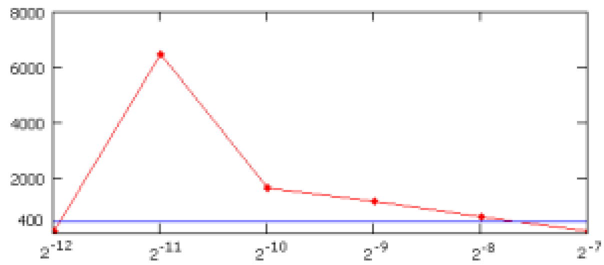

Рис. 4. Время интегрирования кинематических уравнений в параметрах Родрига–Гамильтона методом Рунге–Кутта 3-го порядка аппроксимации для шага интегрирования $2^{-12}, \dots, 2^{-7}$ в 32-разрядной ЦА

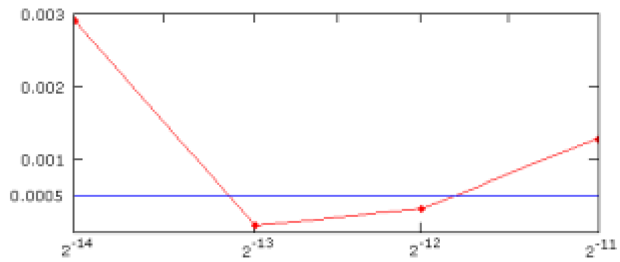

Рис. 5. Максимальные абсолютные погрешности вычислений кинематических параметров Родрига–Гамильтона методом Рунге–Кутта 2-го порядка аппроксимации для шага интегрирования $2^{-14}, \dots, 2^{-11}$ в 32-разрядной ЦА

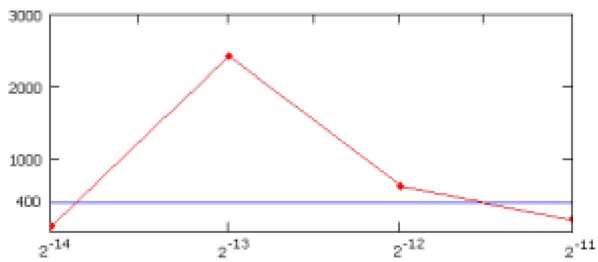

Рис. 6. Время интегрирования кинематических уравнений в параметрах Родрига–Гамильтона методом Рунге–Кутта 2-го порядка аппроксимации для шага интегрирования $2^{-14}, \dots, 2^{-11}$ в 32-разрядной ЦА

Таким образом, как видно из рис. 1-6, при уменьшении порядка аппроксимации метода Рунге–Кутта требуемую точность вычисления кинематических параметров Родрига–Гамильтона можно получить только в результате уменьшения шага интегрирования системы дифференциальных уравнений. Уменьшение шага интегрирования ведёт в свою очередь к увеличению числа шагов перерасчёта кинематических параметров Родрига–Гамильтона и является причиной накопления погрешности их вычислений. Как следствие, обоснованным к использованию в системе управления АПО рассматриваемого типа является метод Рунге–Кутта 4-го порядка аппроксимации решения кинематических уравнений.

Результаты, приведенные на рис. 1-6 были получены для предельных значений проекций угловой скорости вращения АПО $w_{xE}(t), w_{yE}(t), w_{zE}(t)$ на оси связанной с ним системы координат E – 5 рад/с, рис. 7.

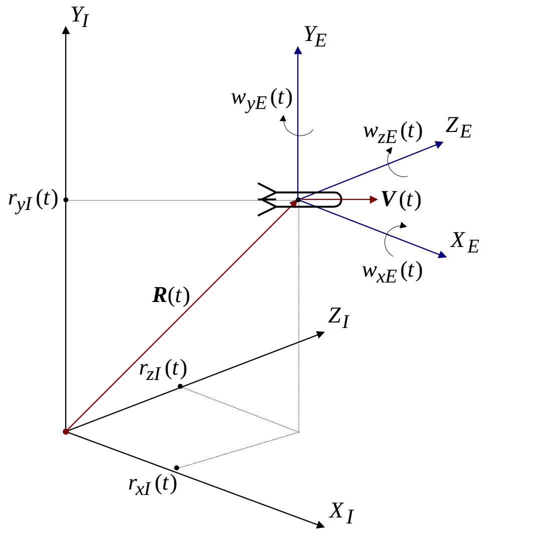

Рис. 7. Проекции скорости вращения АПО в связанной с ним системе координат

$\boldsymbol{R}(t)$ и $\boldsymbol{V}(t)$ на рис. 7 – расположение центра масс АПО и скорость его движения в инерциальной системе координат I, для вычисления которых и осуществляется непрерывный перерасчёт параметров ориентации АПО в его системе координат.

Поскольку предельные значения проекций угловой скорости вращения АПО не являются характерными, аналогичные исследования были проведены и для других значений их проекций, табл. 1.

Табл. 1. Значения проекций угловой скорости вращения АПО

№ варианта	w_{xE}, рад/с	w_{yE}, рад/с	w_{zE}, рад/с
1	5.0	5.0	5.0
2	5.0	5.0	2.5
3	5.0	2.5	2.5
4	5.0	2.5	0.5
5	2.5	2.5	2.5
6	2.5	0.5	0.5
7	2.5	0.5	0.25
8	0.5	0. 5	0.5
9	0.5	0. 25	0.25
10	0.25	0. 25	0.25

Результаты вычислений приведены на рис. 8.

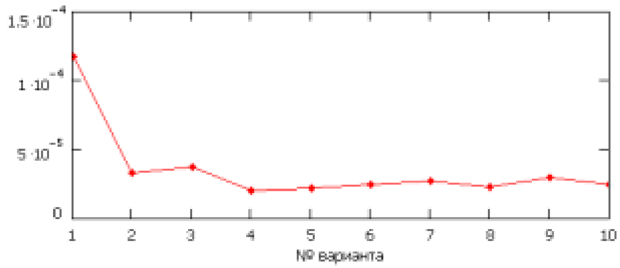

Рис. 8. Максимальные абсолютные погрешности вычислений кинематических параметров Родрига–Гамильтона методом Рунге–Кутта 4-го порядка аппроксимации для различных значений проекций угловой скорости вращения АПО на оси связанной с ним системы координат

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были получены максимальные значения абсолютной погрешности вычисления кинематических параметров Родрига-Гамильтона в нейросетевой системе управления движением АПО. Показано, что наиболее приемлемым для рассматриваемых параметров движения АПО является аппроксимация решения системы кинематических уравнений в параметрах Родрига-Гамильтона методом Рунге-Кутта 4-го порядка.

Дальнейшая работа над системой управления движением АПО предполагает и нейросетевую реализацию вычисления его навигационных параметров. В случае нахождения эффективного решения этой задачи вся система управления движением АПО может быть реализована в едином нейросетевом базисе. Это позволит существенно повысить уровень организации вычислений и позволит эффективно решать как неформализованные задачи, например, распознавание цели движения АПО, так и формализованные – вычисление его кинематических и навигационных параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бранец, В.Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твёрдого тела [Текст] / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: наука, 1973. – 320 с.

2. Бойчук, О.Ф. Построение функции ляпунова для совокупности уравнений основной задачи инерциальной навигации [Текст] / О.Ф. Бойчук, А.Ю. Ишлинский, В.А. Стороженко // Механика твёрдого тела. 1975. №5. – с. 13 – 18.

3. Галушкин, А.И. Теория нейронных сетей [Текст] / А.И. Галушкин. – М.: ИПРЖР, 2000. – 416 с.

4. Винокуров, И.В. Интегрирование систем дифференциальных уравнений в нейросетевом логическом базисе [Текст] / И.В. Винокуров // «Инновации и инвестиции». 2017. – № 11. – С.114-117.

5. Винокуров, И.В. Синтез искусственной нейронной сети для интегрирования кинематических уравнений в параметрах Родрига-Гамильтона [Текст] / И.В. Винокуров // «Инновации и инвестиции». 2018. – № 1. – С. 144-146.

Винокуров Игорь Викторович – к.т.н., доцент кафедры «Информатика и информационные технологии» КГУ им. К.Э. Циолковского, тел. 8 (4842) 22-04-06, e-mail: vinokurov_iv@mail.ru.

RESEARCH OF THE ACCURACY OF NEURAL NETWORK COMPUTING KINEMATIC PARAMETERS OF RODRIGUES-HAMILTON

I.V. Vinokurov

Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovski, Kaluga

The integration of kinematic equations in the Rodrigues-Hamilton parameters is characterized by asymptotic instability. The result is a significant accumulation of errors in their calculations with the relative long-term movement of an autonomous moving object (AMO). The use of neural network principles of the organization of the computational process in free-form inertial navigation systems (SINS) will significantly reduce the error in calculating their kinematic parameters and, consequently, increase the efficiency of the AMO control system. The article investigates the error of neural network calculations of the Rodrigues-Hamilton kinematic parameters for the required motion conditions of the APS. All calculations are carried out on the neuroprocessor of the AMO control system.

Index terms: *kinematic parameters, artificial neural networks.*

REFERENCES

1. Branec, V.N. Primenenie kvaternionov v zadachah orientacii tvyordogo tela, V.N. Branec, I.P. Shmyglevskij. M.: Nauka, 1973, 320 p.
2. Bojchuk, O.F., A.YU. Ishlinskij, and V.A. Storozhenko “Postroenie funkcii Lyapunova dlya sovokupnosti uravnenij osnovnoj zadachi inercial'noj navigacii”, *Mekhanika tvyordogo tela*, 1975, № 5, pp. 13-18.
3. Galushkin, A.I. Teoriya nejronnyh setej, A.I. Galushkin. M.: IPRZHR, 2000, 416 p.
4. Vinokurov, I.V. “Integrirovanie sistem differencial'nyh uravnenij v nejrose¬tevom logicheskom bazise”, *Innovacii i investicii*, 2017, № 11, pp. 114-117.
5. Vinokurov, I.V. “Sintez iskusstvennoj nejronnoj seti dlya integrirovaniya kinematicheskih uravnenij v parametrah Rodriga-Gamil'tona”, *Innovacii i investicii*, 2018, № 1, pp. 144-146.

Vinokurov Igor Viktorovich – PhD. (IT), Associate Professor, “Informatics and Information Technologies”, Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovski, 8 (4842) 22-04-06, e-mail: vinokurov_iv@mail.ru.