

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БИНС В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ШИРОТ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ*

Ю. Н. Коркишко¹, В. А. Федоров², В. Е. Прилуцкий³,

ООО НПК «Оптолинк», Российская Федерация, 124498, Москва, Зеленоград, пр. 4806, д. 5
тел. (+7495)5369953, факс (+7495)5369934, E-mail: opto@optolink.ru

П. К. Плотников⁴, А. В. Михеев⁵, С. Г. Наумов⁶

Саратовский государственный технический университет, Россия,
410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77. Тел. (+78452)799174, E-mail: pribor@sstu.ru

Аннотация

Ключевые слова: углы Эйлера-Крылова, кватернионы, особые точки, вариация Аллана, шумы датчиков

Предлагается алгоритм функционирования БИНС на основе переключаемых алгоритмов в углах Эйлера-Крылова и кватернионах для работы на подвижных объектах (ПО) в условиях высоких широт и больших величин углов тангажа. Рассмотрены варианты движения объекта через Северный полюс, а также при выполнении мертвой петли. Приведены результаты моделирования как идеальной работы системы, так и с учетом погрешностей реальных датчиков.

Постановка задачи. Использование для работы БИНС классических параметров ориентации, таких, как, например, углы Эйлера-Крылова, продиктовано наличием у них таких преимуществ, как наглядная геометрическая интерпретация и простота построенных на их основе дифференциальных уравнений, что обуславливает снижение вычислительной нагрузки на бортовой вычислитель и достаточно высокую точность решения задач ориентации и навигации. Однако уравнения на основе углов Эйлера-Крылова имеют недостатки, связанные с ограниченным диапазоном измеряемых углов. При определенных значениях угла тангажа кинематические уравнения вырождаются, что приводит к сбою системы навигации. Такие же проблемы возникают при работе БИНС в высоких широтах.

Решение задачи. Работа БИНС, основанной на кинематических уравнениях в углах Эйлера-Крылова, имеет ряд ограничений, связанных с диапазоном измеряемых углов, поскольку система имеет особые точки (тангаж $\pm 90^\circ$, широта $87^\circ < \phi, -87^\circ > \phi$), в которых кинематические уравнения в углах Эйлера-Крылова вырождаются, что следует, например, из уравнений [1, 2]:

$$\dot{\gamma} = \left[(\omega_{\eta_1} + \omega_{\eta_1}^k) \cos \psi - (\omega_{\eta_3} + \omega_{\eta_3}^k) \sin \psi \right] \cos^{-1} \theta; \quad (1)$$

$$\dot{\lambda} = -\frac{\omega_{\zeta 1}^k}{\cos \phi} - U, \quad (2)$$

где ϕ, λ – оценки углов географических широты и долготы; ψ, θ, γ – оценки углов ориентации; $\omega_{\eta_1}, \omega_{\eta_3}$ – абсолютные угловые скорости объекта, спроецированные на оси горизонтной системы координат, свободной в азимуте, $\omega_{\eta_1}^k, \omega_{\eta_3}^k$ – угловые скорости коррекции в осях свободной в азимуте системы координат, $\omega_{\zeta 1}^k$ – угловая скорость коррекции в осях географической системы координат [2], U – угловая скорость вращения Земли.

Одновременно с этим, дифференциальные уравнения в углах Эйлера-Крылова дают более высокую точность, имеющую место при небольших величинах углов тангажа и в условиях низких широт. В то же время кватернионные алгоритмы не имеют особых точек (не вырождаются для любых положений ПО в пространстве) и практически не содержат тригонометрических функций. Поэтому для решения задач ориентации и навигации для ПО, совершающих движение в области высоких широт, или сложные маневры по углу тангажа, целесообразно применять переключение между алгоритмами в углах Эйлера-Крылова и кватернионными.

¹ Д.ф.-м.н., профессор, ген. директор ООО НПК «Оптолинк».

² Д.ф.-м.н., профессор, техн. директор ООО НПК «Оптолинк».

³ Директор Саратовского отделения ООО НПК «Оптолинк».

⁴ Д.т.н. профессор, зав. кафедрой приборостроения СГТУ.

⁵ Ассистент кафедры приборостроения СГТУ.

⁶ Аспирант кафедры приборостроения СГТУ.

В кинематические уравнения, отнесенные к горизонтальному свободному в азимуте трехграннику, введены корректирующие члены позиционно-интегральной горизонтальной коррекции от сигналов измерителей кажущихся ускорений. При начальной выставке используется режим радиально-позиционной горизонтальной коррекции, и только интегральная коррекция с периодом Пуллера – в рабочем режиме. Предусмотрены условия переключения алгоритмов с кинематических уравнений Эйлера на кватернионы, и наоборот.

Для проверки этих условий, наряду с обычными, рассматриваются особые режимы движения ПО – прохождение северного и южного полюсов, а также выполнение ПО мертвой петли. В этих условиях система переводится на вычисление кватернионов с возможностью пересчета в углы Эйлера-Крылова:

$$\psi = \operatorname{arctg}\left(-\frac{2(v_0v_2 - v_1v_3)}{v_0^2 + v_1^2 - v_2^2 - v_3^2}\right), \quad \theta = \operatorname{arcsin}\left(2(v_1v_2 + v_0v_3)\right), \quad \gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{2(v_0v_1 - v_2v_3)}{v_0^2 + v_2^2 - v_1^2 - v_3^2}\right); \quad (3)$$

$$\phi = \operatorname{arcsin}(2(\varepsilon_1\varepsilon_2 - \varepsilon_0\varepsilon_3)); \quad \lambda = \operatorname{arcsin}(-2(\varepsilon_2\varepsilon_3 - \varepsilon_0\varepsilon_1)) - Ut,$$

где $v_0 \dots v_3$ - кватернионы ориентации; $\varepsilon_0 \dots \varepsilon_3$ - кватернионы навигации.

Для обеспечения адекватности проводимого математического моделирования и работы реальной БИНС использовалась методика учета погрешностей реальных датчиков, описанная в [1]. Подтверждение работоспособности предложенной схемы переключения проводилось путем математического моделирования по алгоритмам идеальной работы БИНС, т.е. когда погрешности датчиков первичной информации (ДПИ) отсутствовали. Для этого были рассмотрены следующие случаи движения ПО. В первом случае объект, подвергаясь воздействию качки по курсу, тангажу и крену, перемещался в северном направлении и пересекал полюс. На широте 87° происходило переключение алгоритмов в виде уравнений Эйлера [2, 3] на кватернионные [4], а по выходе объекта из области высоких широт происходило обратное переключение. Дополнительно для снижения погрешности по углу рыскания, в области широт после 89° в кватернионных алгоритмах задано переключение вертикальной коррекции:

$$\omega_{\zeta_2}^k = \begin{cases} \omega_{\zeta_1}^k \frac{2(\varepsilon_1\varepsilon_2 - \varepsilon_0\varepsilon_3)}{\sqrt{1 - 4(\varepsilon_1\varepsilon_2 - \varepsilon_0\varepsilon_3)^2}}, & \phi \leq 89^\circ; \\ -2U(\varepsilon_1\varepsilon_2 - \varepsilon_0\varepsilon_3) - \frac{v_{\zeta_3}}{R} \frac{2(\varepsilon_1\varepsilon_2 - \varepsilon_0\varepsilon_3)}{\sqrt{1 - 4(\varepsilon_1\varepsilon_2 - \varepsilon_0\varepsilon_3)^2}}, & \phi > 89^\circ, \end{cases} \quad (4)$$

где $\omega_{\zeta_2}^k$ - вертикальная угловая скорость коррекции в осях географической системы координат; v_{ζ_3} - оценка восточной составляющей относительной скорости движения ПО (при моделировании рассматривался случай, когда $v_{\zeta_3} = 0$), R - радиус Земли.

Во втором случае ПО совершал эволюцию по тангажу от 0° до 360° , тем самым описывая мертвую петлю. При превышении угла тангажа $\pm 30^\circ$ происходило переключение на кватернионные алгоритмы.

При моделировании использовался численный алгоритм интегрирования Рунге-Кутты 4(5) порядка [5] с изменяемым шагом интегрирования с максимальным значением 0,01 с. Для режима гирокомпасирования введена компенсация поворотных ускорений и скоростной погрешности. Модель Земли принята в виде сферы. В начале моделирования ($t < 500$ с) производилась начальная выставка на неподвижном относительно Земли ПО (рис. 1). Затем с момента времени $t = 1000$ с и до конца моделирования включалась качка объекта по каналам курса Ψ , тангажа θ и крена γ [1]. Также для ПО задавалось равноускоренное движение вдоль оси ζ_1 с последующим движением с постоянной скоростью 1000 км/ч. Время работы БИНС $1,4 \cdot 10^4$ с.

На рис. 1 представлены графики погрешностей определения углов ориентации ПО, а также координат места с помощью БИНС при работе ее по идеальным алгоритмам. Как видно из графиков, погрешности по углам тангажа и крена незначительно накапливаются и к моменту времени $t = 1,4 \cdot 10^4$ с достигают значений $\Delta\theta = 6 \cdot 10^{-9}^\circ$; $\Delta\gamma = 8 \cdot 10^{-10}^\circ$; по углу курса нарастание погрешности происходило сильнее и составило $\Delta\Psi = 2,5 \cdot 10^{-9}^\circ$. На графике виден момент переключения вертикальной коррекции ($\sim 10^4$ с). Погрешности определения координат на момент завершения движения $\Delta\zeta_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ м; $\Delta\zeta_3 = 1,2 \cdot 10^{-4}$ м. При выполнении мертвой петли (рис. 2) погрешности составили следующие величины. По углам тангажа и крена $\Delta\theta = 0,4 \cdot 10^{-7}^\circ$; $\Delta\gamma = 1,1 \cdot 10^{-7}^\circ$; по углу курса $\Delta\Psi = 1,5 \cdot 10^{-7}$; погрешности определения координат $\Delta\zeta_2 = 4 \cdot 10^{-7}$ м; $\Delta\zeta_3 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м.

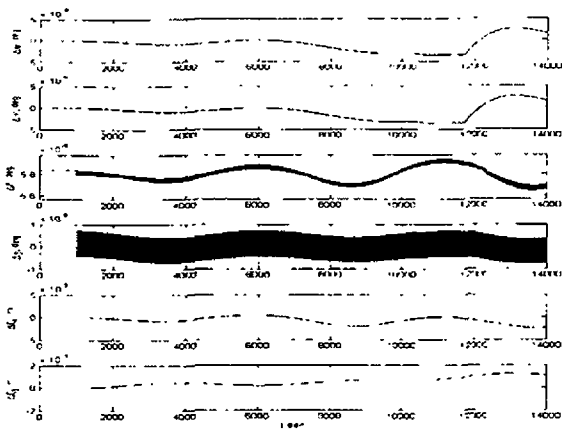


Рис. 1. Погрешности идеальных алгоритмов БИНС при прохождении ПО северного полюса

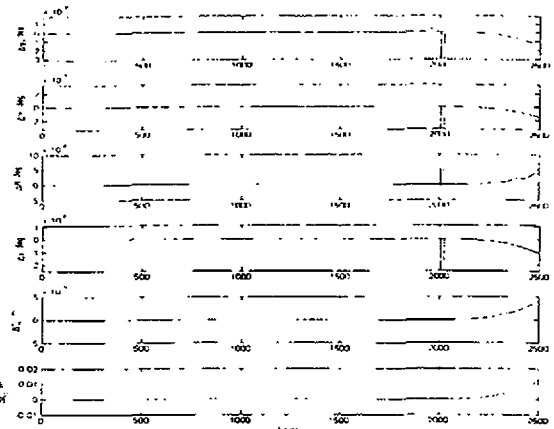


Рис. 2. Погрешности идеальных алгоритмов БИНС при выполнении мертвой петли

Математическое моделирование работы БИНС на основе реальных датчиков проводилось с учетом их погрешностей в виде дрейфов гироскопов, сдвигов нулей акселерометров, погрешностей масштабных коэффициентов, их нелинейности и асимметрии, а также шумов выходных сигналов. Значения погрешностей датчиков определялись по записям действующих приборов (ПНСК 40-018, ООО НПК «Оптолинк» и акселерометров АКП-2, ИЦАП). Для получения шумовых характеристик ДПИ производилась обработка их сигналов и вычислялись коэффициенты вариации Аллана (N, B, K, q, t_c) (рис. 3). Затем вычисленные параметры использовались для формирования шумовых погрешностей сигналов датчиков БИНС (рис. 4, моделируемые и реальные шумы практически совпадают) при математическом моделировании.

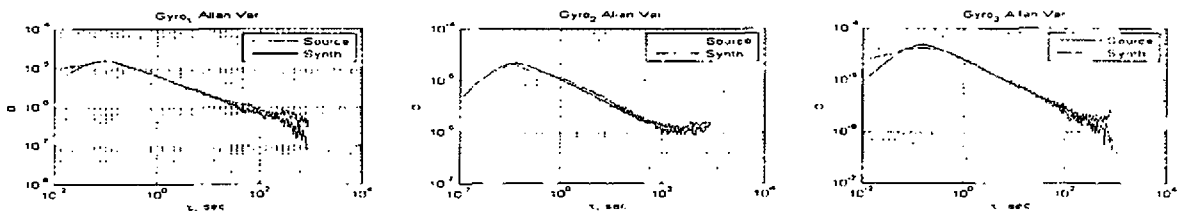


Рис. 3. Графики вариаций Аллана исходных и синтезированных сигналов гироскопов

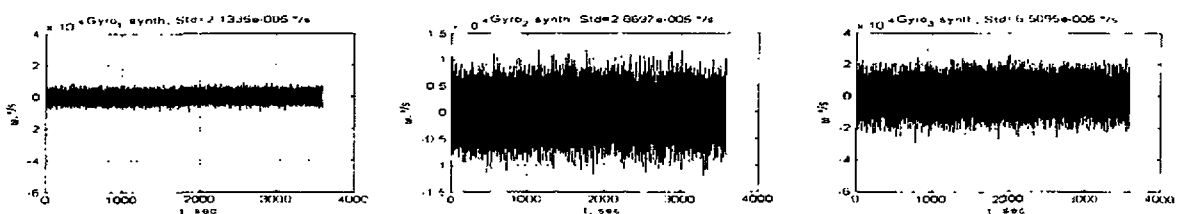


Рис. 4. Графики синтезированных сигналов гироскопов

Были учтены следующие погрешности ДПИ: систематические составляющие угловых скоростей дрейфов ВОГ, $\Delta\omega_{xi} = 0,005$ ($i=1,2,3$) $^\circ/\text{час}$; погрешности масштабных коэффициентов ВОГ, $\delta\omega_{xi} = 0,8 \cdot 10^{-4}$ ($i=1,2,3$); погрешности несимметрии статических характеристик, $\Delta\omega_{xi} = 0,8 \cdot 10^{-6}$ ($i=1,2,3$); смещение нулей акселерометров, $\Delta W_{xi} = 4 \cdot 10^{-4}$ $\text{м}/\text{с}^2$; погрешности масштабных коэффициентов, $\delta W_{xi} = 10^{-4}$ ($i=1,2,3$).

Результаты математического моделирования БИНС для этих условий при прохождении ПО северного полюса приведены на рис. 5. Получены следующие величины погрешностей за время $t = 1,4 \cdot 10^4$ с: $\Delta\psi = 0,75$ $^\circ$; $\Delta\varphi = 0,75$ $^\circ$; $\Delta\theta = 1,3 \cdot 10^{-2}$ $^\circ$; $\Delta\gamma = 4 \cdot 10^{-2}$ $^\circ$; $\Delta\zeta_1 = 2,1$ км; $\Delta\zeta_3 = 16,2$ км.

Для аналогичных условий при выполнении ПО мертвой петли получены следующие результаты:

$\Delta\psi = 5 \cdot 10^{-3}$ $^\circ$; $\Delta\varphi = 5 \cdot 10^{-3}$ $^\circ$; $\Delta\theta = 3,2 \cdot 10^{-2}$ $^\circ$; $\Delta\gamma = 4 \cdot 10^{-3}$ $^\circ$; $\Delta\zeta_1 = 0,63$ км; $\Delta\zeta_3 = 0,3$ км за 2500 с (время выполнения самой петли составило 30 с).

Результаты моделирования показывают, что при переключении алгоритмов расчета параметров ориентации с дифференциальных кинематических уравнений Эйлера-Крылова на кватернионные, с учетом погрешностей датчиков, точность остается на приемлемом уровне, что подтверждает целесообразность применения комплексного алгоритма.

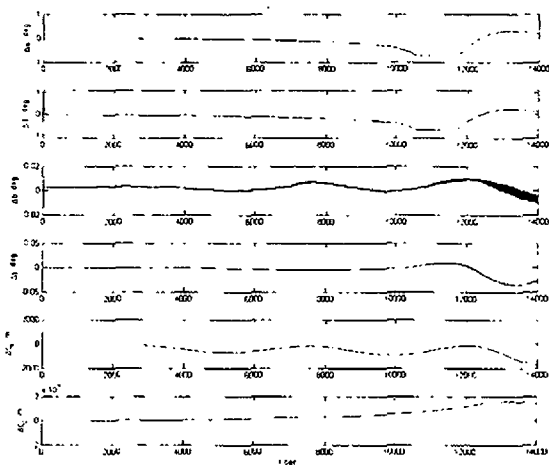


Рис. 5. Погрешности БИНС при прохождении ПЮ северного полюса с учетом погрешностей датчиков

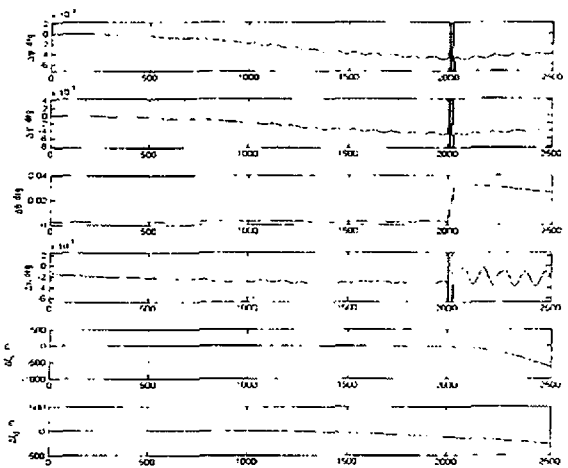


Рис. 6. Погрешности БИНС при выполнении мертвой петли с учетом погрешностей датчиков

Заключение. Показана приемлемая точность алгоритмов, предусматривающих переключение дифференциальных кинематических уравнений Эйлера с введенными членами коррекции на кватернионные как при отсутствии, так и при наличии погрешностей ДПИ, которые определены на основе их экспериментальных записей. При определении оценок шумовых параметров сигналов ДПИ (ВОГ ПНСК 40-018 и акселерометров АКП-2) использовалась вариация Аллана. Численно значения погрешности датчиков составили следующие величины: сдвиг нулей ВОГ $\Delta\omega_{vi}=0,005$ ($i=1,2,3$) °/час, погрешности масштабных коэффициентов $\delta\omega_{vi}=8\cdot 10^{-5}$ ($i=1,2,3$), погрешности несимметрии статических характеристик ВОГ $\Delta\omega_{vi}=0,8\cdot 10^{-6}$ ($i=1,2,3$), шумы гироскопов с СКО $2,3\cdot 10^{-5}$ $6,6\cdot 10^{-5}$ %/с, сдвиги нулей акселерометров $\Delta W_{vi}=4\cdot 10^{-4}$ м/с², погрешности их масштабных коэффициентов $\delta W_{vi}=10^{-4}$ ($i=1,2,3$), шумы акселерометров с СКО $2,3\cdot 10^{-4}$ – $6,1\cdot 10^{-4}$ м/с².

С учетом погрешностей реальных датчиков при математическом моделировании были получены следующие результаты. При прохождении ПЮ через полюс оценки погрешностей определения координат местоположения объекта с помощью автономной БИНС составили в северном $\Delta\zeta_1=2,1$ км и восточном направлениях $\Delta\zeta_2=16,2$ км, а также по углу курса $\Delta\psi=0,75^\circ$ за время $t=1,4\cdot 10^4$ с. При выполнении мертвой петли погрешности определения координат местоположения объекта с помощью БИНС составили в северном $\Delta\zeta_1=0,63$ км и восточном направлениях $\Delta\zeta_2=0,3$ км, а также по углу курса $\Delta\psi=5\cdot 10^{-3}$ ° за время $t=2,5\cdot 10^3$ с.

Литература

1. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Плотников П.К., Михеев А.В. Экспериментальные исследования ВОГ и акселерометров, анализ их параметров и прогнозирование погрешностей БИНС // Материалы XV СПб. межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- СПб.: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». 2008.- С.80-86.
2. Плотников П.К. Теория работы одной разновидности бесплатформенных инерциальных систем ориентации// Гироскопия и навигация. - 1999.- № 3. – С. 23-31.
3. Анучин О.Н., Емельянец Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. Л.: ЦНИИ «Электроприбор», 1999. – 356 с.
4. Бранец В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. - М.: Наука, 1973. – 320 с.
5. Prince P.J., Dorman J.R. High order embedded Runge-Kutta formulae. J.Conp. Appl. Math. : 1981. Vol 7. pp. 67-75.