

УДК 629.7.054.07

Исследование алгоритмов моделирования полусвободной в азимуте навигационной системы координат для движения с ненулевой высотой

Кондрашкин Георгий Викторович^(*)

kondrashkingv@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены алгоритмы определения угловой скорости вращения горизонтальной навигационной системы координат с произвольной ориентацией в азимуте относительно общеземного эллипсоида (транспортирующая угловая скорость). Проведено моделирование нескольких алгоритмов определения транспортирующей угловой скорости. Отмечено, что по результатам моделирования рассмотренных алгоритмов их применение при движении с ненулевой высотой приводит к возникновению ошибок в определении географических координат даже при идеальном определении составляющих линейной скорости.

Ключевые слова: алгоритмы, транспортирующая угловая скорость, полусвободная навигационная система координат, высота, погрешности определения координат

Введение. В отечественных [1, 2] и зарубежных [3, 4] научных публикациях встречаются различные алгоритмы вычисления транспортирующей угловой скорости. При исследовании погрешностей инерциальных навигационных систем (ИНС), составляющие погрешности, возникающие из-за неточности вычисления радиусов кривизны и порождаемых ей ошибок вычисления транспортирующей угловой скорости, обычно не рассматриваются и считаются намного меньшими по сравнению с другими погрешностями. Для движения на больших высотах с высокими скоростями указанные погрешности становятся значительными, что говорит об актуальности исследования их величин. В работе проведено моделирование погрешностей ИНС в определении координат, возникающих при использовании алгоритмов вычисления транспортирующей угловой скорости, встречающихся в научных публикациях.

Материалы и методы; результаты. Рассмотрены следующие алгоритмы вычисления транспортирующей угловой скорости.

Алгоритм № 1. Составляющие транспортирующей угловой скорости Ω_x и Ω_y вычисляются по формулам (1):

$$\begin{aligned}\Omega_x &= -V_y \left(\frac{\sin^2(\chi)}{N} + \frac{\cos^2(\chi)}{M} \right) - V_x \sin(\chi) \cos(\chi) \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{N} \right); \\ \Omega_y &= V_x \left(\frac{\sin^2(\chi)}{M} + \frac{\cos^2(\chi)}{N} \right) + V_y \sin(\chi) \cos(\chi) \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{N} \right); \\ N &= \frac{a+h}{\sqrt{1-e^2 \sin^2(B)}}; \\ M &= \frac{(a+h)(1-e^2)}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2(B))^3}},\end{aligned}\tag{1}$$

где a — большая полуось общеземного эллипсоида; e — эксцентриситет общеземного эллипсоида; B — геодезическая широта; h — высота над поверхностью общеземного эллипсоида; V_x и V_y — составляющие линейной скорости; χ — угол поворота в азимуте навигационной системы координат.

Алгоритм № 2. Составляющие транспортирующей угловой скорости Ω_x и Ω_y вычисляются по формулам (2):

$$\begin{aligned}\Omega_x &= -V_y \left(\frac{\sin^2(\chi)}{N} + \frac{\cos^2(\chi)}{M} \right) - V_x \sin(\chi) \cos(\chi) \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{N} \right); \\ \Omega_y &= V_x \left(\frac{\sin^2(\chi)}{M} + \frac{\cos^2(\chi)}{N} \right) + V_y \sin(\chi) \cos(\chi) \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{N} \right); \\ N &= \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2(B)}} + h; \\ M &= \frac{a(1-e^2)}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2(B))^3}} + h,\end{aligned}\quad (2)$$

Алгоритм № 3. Составляющие транспортирующей угловой скорости Ω_x и Ω_y вычисляются по формулам (3):

$$\begin{aligned}\Omega_x &= -\frac{V_y}{R_y} - \frac{V_x}{a} e^2 \cos^2(B) \sin(\chi) \cos(\chi); \\ \Omega_y &= \frac{V_x}{R_x} + \frac{V_y}{a} e^2 \cos^2(B) \sin(\chi) \cos(\chi); \\ \frac{1}{R_x} &= \frac{1}{a} \left(1 - \frac{1}{2} e^2 \sin^2(B) + e^2 \cos^2(B) \sin^2(\chi) - \frac{H}{a} \right); \\ \frac{1}{R_y} &= \frac{1}{a} \left(1 - \frac{1}{2} e^2 \sin^2(B) + e^2 \cos^2(B) \cos^2(\chi) - \frac{H}{a} \right).\end{aligned}\quad (3)$$

Проведено моделирование погрешностей ИНС в определении географических координат интегрированием кватернионного кинематического уравнения, возникающих при использовании приведенных алгоритмов вычисления транспортирующей угловой скорости. Результаты моделирования приведены в таблице.

Результаты моделирования различных алгоритмов

Номер алгоритма	Скорость, м/с	Высота, м	Значения максимальных погрешностей определения координат в геоцентрической системе координат, м		
			Ось X	Ось Y	Ось Z
1	500	50	208	184	251
		20 000	78 483	-63 922	90 684
2	500	50	-57 887	-75 770	-49 747
		20 000	47 688	-75 776	-48 824
3	500	50	-104	107	-76
		20 000	283	253	265

Заключение. Результаты моделирования показали, что при движении с ненулевой высотой даже при идеальном определении составляющих линейной скорости возникают ошибки в определении координат, которые могут достигать порядка десятков километров. Наименьшие погрешности определения географических координат достигнуты при использовании алгоритма вычисления транспортирующей угловой скорости № 3.

Список источников

- [1] Голован А.А., Парусников Н.А. *Математические основы навигационных систем. Ч. I. Математические модели инерциальной навигации*. Москва, МАКС Пресс, 2011, 136 с.
- [2] Бромберг П.В. *Теория инерциальных систем навигации*. Москва, Наука, 1979, 296 с.
- [3] Мелешко В.В., Нестеренко О.И. *Бесплатформенные инерциальные навигационные системы*. Кировоград, ПОЛИМЕД — Сервис, 2011, 172 с.
- [4] Savage P.G. *Strapdown analytics. Part 1. Strapdown Associates*. Minnesota, Inc. Maple Plain, 2000, 817 p.