

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Елисеев Д. С.,

научный руководитель д-р техн. наук Алешечкин А. М.

Сибирский федеральный университет

Прогресс в области вычислительной техники, микроэлектроники и приборостроения сделал возможным создание бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) с приемлемыми точностными характеристиками. Данные системы обладают рядом преимуществ: малые масса, габариты и потребление энергии, удобство контроля и резервирования. Также можно отметить низкую стоимость инерциальных датчиков – акселерометров и гироскопов.

В настоящее время в гироскопической технике можно выделить пять основных технологий, обеспечивающих потребности массового потребителя — динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ), кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ), волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), волновые твердотельные гироскопы (ВТГ), микромеханические гироскопы (ММГ). Для сверхвысокоточных измерений используются электростатические гироскопы (ЭСГ); ограниченное применение для этих целей находят поплавковые гироскопы с магнитным центрированием поплавка и гироскопы с магнитным подвесом сферического ротора [1, 2].

Наиболее распространенными типами акселерометров являются маятниковые акселерометры, электромеханические осевые акселерометры с поступательным перемещением чувствительной массы, струнные акселерометры, высокоточные трехкоординатные электростатические акселерометры с неконтактным подвесом чувствительной массы в электростатическом поле, пьезоэлектрические акселерометры, акселерометры на поверхностно-акустических волнах [1, 2].

В программе Simulink была спроектирована математическая модель БИНС. Одним из основных её элементов является инерциальный измерительный блок (ИИБ), в состав которого входят блоки акселерометров (БА) и гироскопов (БГ).

Табл. 1. Классификация ИИБ по точности

Тип ИИБ	Уходы акселерометров, м/с^2	Уходы гироскопов, рад/с	Случайный шум акселерометров, $\mu\text{г}/\sqrt{\text{Гц}}$	Случайный шум гироскопов, $^\circ/\sqrt{\text{ч}}$
Морские	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-9}$	<20	<0.002
Авиационные	$3 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-8}$	20	0.002
Промежуточные	$10^{-3} - 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-7}$	20 – 100	0.002 – 0.03
Тактические	$10^{-2} - 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-6}$	100–1000	0.03 – 1
Автомобильные	$>10^{-1}$	$>5 \cdot 10^{-4}$	>1000	>1

Промышленностью выпускается большое число типоразмеров ИИБ, которые значительно различаются как по точности, так и по стоимости. Например, разброс уходов акселерометров составляет около 3 порядков, а разброс уходов гироскопов –

около 6 порядков. В табл. 1 приведены параметры различных типов ИИБ, от которых зависит точность датчиков [2].

Несмотря на такой широкий спектр инерциальных датчиков, все они могут быть описаны с помощью следующей математической модели, включающей в себя основные ошибки акселерометров и гироскопов[3]:

$$\tilde{f}_{ib}^b = b_a + M_a f_{ib}^b + w_a \quad (1)$$

$$\tilde{\omega}_{ib}^b = b_g + M_g \omega_{ib}^b + G_g f_{ib}^b + w_g \quad (2)$$

где f_{ib}^b , ω_{ib}^b – истинные значение ускорения и угловой скорости; M_a, M_g – матрицы 3×3 , которые содержит масштабные коэффициенты по диагонали, а недиагональные члены характеризуют несоответствие направлений осей акселерометров и гироскопов осям системы координат связанной с объектом; b_a, b_g – уходы нулей акселерометров и гироскопов; w_a, w_g – случайный шум акселерометров и гироскопов.

Даная математическая модель применяется в Simulink для имитации показаний инерциальных датчиков, а также оценки характеристик БИНС, основанных на ИИБ разных типов.

Обработкой показаний ИИБ (угловых скоростей и ускорений) занимается вычислительный процессор. На рис. 1 приведена блок-схема, иллюстрирующая алгоритм работы вычислительного процессора БИНС.

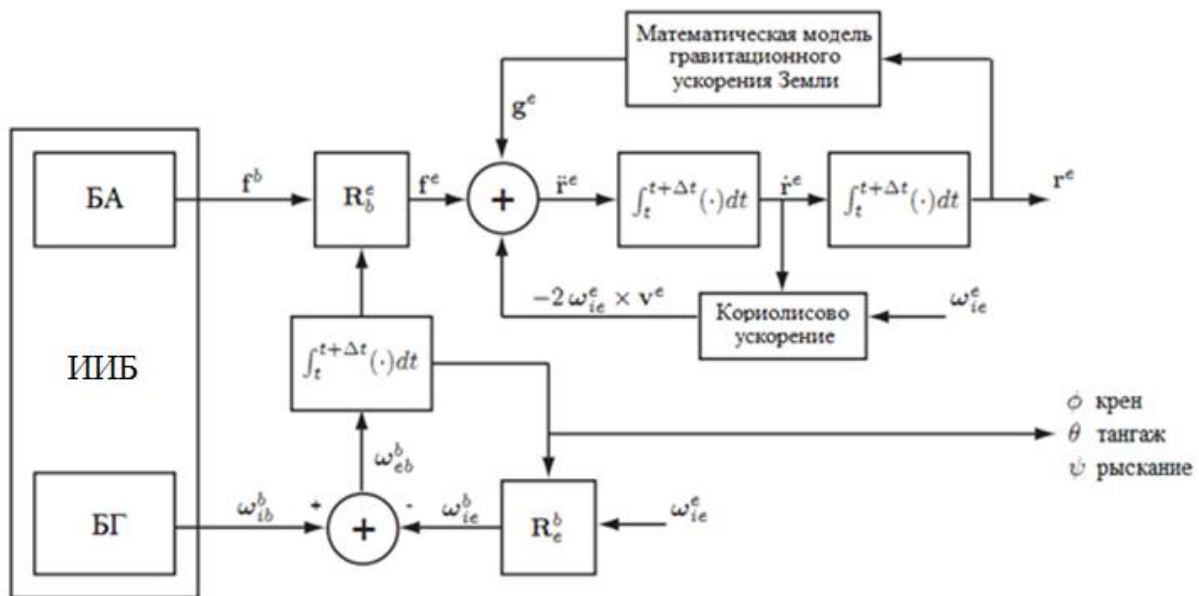


Рис. 1. Блок-схема, иллюстрирующая алгоритм работы БИНС

Алгоритм работы БИНС (рис. 1) в общем случае состоит из следующих этапов:

- 1) Коррекция показаний гироскопов с учетом наличия вращения Земли

$$\omega_{eb}^b = \tilde{\omega}_{ib}^b - R_e^b \cdot \omega_{ie}^e, \quad (3)$$

где ω_{eb}^b – угловая скорость объекта в системе координат связанной с телом; $\tilde{\omega}_{ib}^b$ – угловая скорость (показания гироскопов); ω_{ie}^e – угловая скорость вращения в

геоцентрической системе координат, связанной с Землей (WGS-84); R_e^b – матрица направляющих косинусов (преобразует вектор из системы координат WGS-84 в систему координат связанной с объектом);

2) Интегрирование полученных угловых скоростей. В результате получаем параметры ориентации (углы рыскания, крена и тангажа);

3) Преобразование вектора ускорения из системы координат связанной с объектом в геоцентрическую систему координат

$$f^e = R_b^e \cdot \tilde{f}_{ib}^b, \quad (4)$$

где $R_b^e = R_e^b{}^T$;

4) Компенсация ускорения свободного падения и кориолисова ускорения

$$\ddot{r}^e = R_b^e \cdot \tilde{f}_{ib}^b - 2 \cdot \Omega_{ie}^e \cdot \dot{r}^e + g^e, \quad (5)$$

$$\Omega_{ie}^e = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_{ie_z}^e & 0 \\ \omega_{ie_z}^e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (6)$$

5) Интегрирование ускорения. В результате чего получаем скорости;

$$v_{k+1}^e = v_k^e + T_s \cdot (R_b^e \cdot \tilde{f}_{ib}^b - 2 \cdot \Omega_{ie}^e \cdot \dot{r}^e + g^e), \quad (7)$$

где T_s – период выдачи информации инерциальными датчиками;

б) Интегрирование скоростей. В результате чего получаем координаты;

$$r_{k+1}^e = r_k^e + T_s \cdot v_k^e. \quad (8)$$

Описанный алгоритм работы БИНС был реализован в программе Simulink, а также произведена оценка точности определения местоположения для различных типов ИИБ (табл. 2). На рис. 2 представлен график зависимости накопленной ошибки в определении координат Δr от времени, позволяющий оценить допустимую погрешность измерений для разных типов ИИБ.

Табл. 2. Оценка точности определения местоположения

Тип ИИБ	Ошибка, накопленная за интервал времени $t=100$ с, м	Интервал времени, за который происходит накопление ошибки $\Delta x=100$ м, с
Морские	0.9	980
Авиационные	3.1	580
Промежуточные	10.2	325
Тактические	87.3	110
Автомобильные	867.7	35

Полученные результаты показывают, что БИНС нуждаются в периодической коррекции при помощи внешних навигационных систем, причем, интервал такой коррекции определяется классом ИИБ. И если для морских и авиационных БИНС

интервал коррекции может составлять десятки минут, то для БИНС тактического и автомобильного класса точности требуется коррекция с интервалом менее минуты.

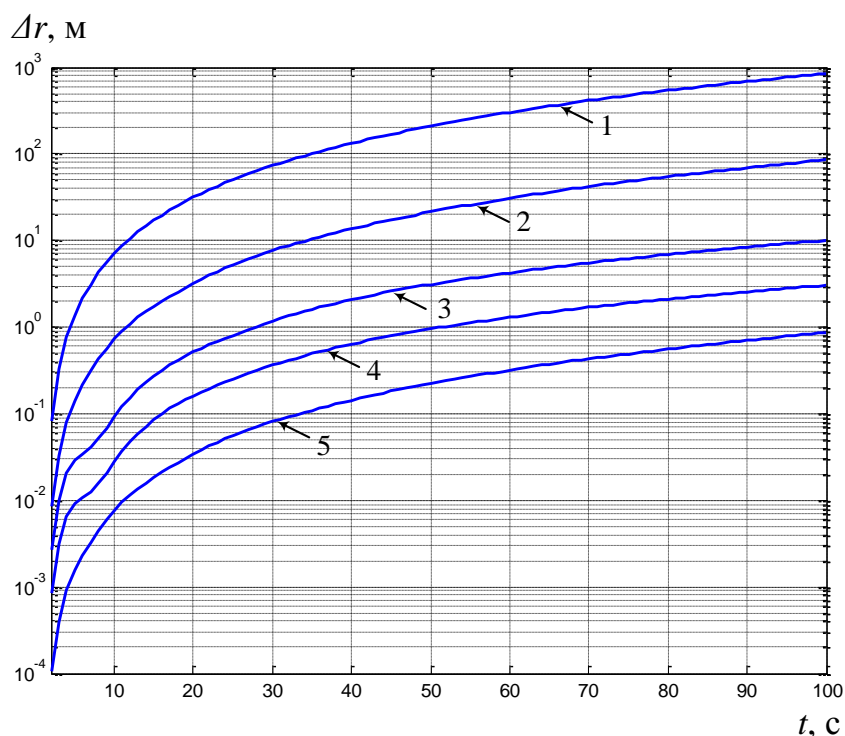


Рис. 2. Накопление ошибки определения координат со временем.

Типы ИИБ: 1 – автомобильные; 2 – тактические; 3 – промежуточные; 4 – авиационные; 5 – морские.

В связи с этим, наиболее часто современные БИНС средней и малой точности применяются в комплексе с навигационной аппаратурой потребителей (НАП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS и ГЛОНАСС.

Работы по объединению СНС и БИНС в рамках одной комплексной навигационной системы ведутся уже давно, и в настоящее время сложилось представление о возможности комплексирования этих систем в четырех основных вариантах [1, 2]:

- отдельная схема;
- слабосвязанная схема;
- жесткосвязанная схема;
- глубоко интегрированная схема.

В настоящее время авторами проводится моделирование алгоритмов комплексирования БИНС и НАП СРНС по слабосвязанной схеме с использованием вычислительных средств системы программирования Matlab R2008b Simulink. Одним из разрабатываемых алгоритмов является расширенный фильтр Калмана для совместной обработки результатов измерений БИНС и НАП СРНС.

Список литературы

1. Алёшин, Б.С. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии/ Под ред. Б. С. Алёшина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2006. – 424 с.
2. P. D. Groves, Principles of GNSS, Inertial and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems, 2008
3. A. Schumacher. Integration of a GPS aided Strapdown Inertial. Navigation System for Land Vehicles, Master of Science Thesis, Stockholm, March 2006