

РАЗДЕЛ V. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ.

УДК 004.383.4

ГИБРИДНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ

С.А. Синютин

В статье описана система навигации транспортного средства с использованием двух подсистем: спутниковой и инерциальной. Инерциальная навигационная система предназначена для навигации в тех случаях, когда не наблюдается необходимое количество навигационных спутников. Кроме того система может включать наземную корректирующую сеть станций навигационных поправок.

Ключевые слова: навигационная система, спутниковая навигация, инерциальная навигация, фильтр Калмана.

В последнее десятилетие получили широкое развитие спутниковые навигационные системы (СНС). Их относительная дешевизна при достаточно высокой точности резко расширили их возможный круг применений. В комбинации с беспроводными технологиями такие системы позволяют разрабатывать сложные распределенные комплексы для наблюдения за перемещением парка автомобилей в интересах одного или нескольких заказчиков.

Применение чисто спутниковых систем ограничено условиями постоянной видимости созвездия из нужного количества спутников, причем для хорошей точности навигационного решения имеют значения углы наблюдения этих спутников. Это приводит к тому, что даже при использовании комбинации ГЛОНАСС/GPS в условиях движения по улицам с многоэтажной застройкой или по лесным просекам неминуемы потери навигации по спутникам.

Решение этой проблемы – применение дополнительной инерциальной навигации, работающей на участках между точками, определяемыми спутниковой навигацией. Такая гибридная навигационная система (ГНС) обычно включает в себя СНС и ИНС, а также программное обеспечение с фильтром Калмана для фильтрации погрешностей и выработки совместного навигационного решения.

Под задачей инерциальной навигации [5] понимается определение местоположения и скорости подвижного объекта (ПО) как материальной точки в принятой системе координат по информации от инерциальных датчиков – акселерометров и датчиков угловой скорости (ДУС).

Акселерометры измеряют вектор кажущегося ускорения ПО. ДУС предназначены для определения ориентации ПО.

Для описания движения ПО используем следующие правые системы координат (СК)

1. Гринвичскую, вращающуюся вместе с Землей СК $Oe\xi\eta\zeta$, начало которой расположено в центре Земли, ось $Oe\eta$ направлена к Северному полюсу, ось $Oe\zeta$ располагается в плоскости Гринвичского меридиана, ось $Oe\xi$ дополняет СК до правой (Ω – угловая скорость вращения Земли).

2. Геодезическую (топоцентрическую) СК $OENh$. Положение ц.м. объекта в навигационной системе координат может быть определено декартовыми координатами ζ, η, ξ радиус-вектора \vec{R} , соединяющего ц.м. Земли и объекта, либо задано геодезическими координатами, связанными с вектором $\vec{\gamma}$ нормальной силы тяжести. Отрезок $QO = h$ является геодезической высотой места, φ – геодезическая широта, определяемая как угол между нормалью к эллипсоиду вращения и экваториальной плоскостью ($\xi\xi$), λ – геодезическая долгота, определяемая как угол между плоскостью геодезического меридиана, проходящего через точку O и ось η , и плоскостью $\eta\zeta$ нулевого, или Гринвичского меридиана.

3. Невращающуюся инерциальную СК (ИСК) $O\xi'\eta'\zeta'$, оси которой соответственно совпадают с осями гринвичской СК в начальный момент времени $t_0=0$.

4. СК $Sxuz$, связанную с объектом (ССК) и совершающую движение вместе с ним. ССК зададим следующим образом: ось u напра-

РАЗДЕЛ V. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ.

вим вдоль продольной оси объекта, ось z – в плоскости (yz) симметрии объекта и перпендикулярна продольной оси, ось x образует правый ортогональный трехгранник. ССК моделируется математически.

4. Инструментальную (приборную) СК $C'xbyzbz$.

Связи БИНС и вычислителя при решении навигационной задачи показаны на рисунке 1.

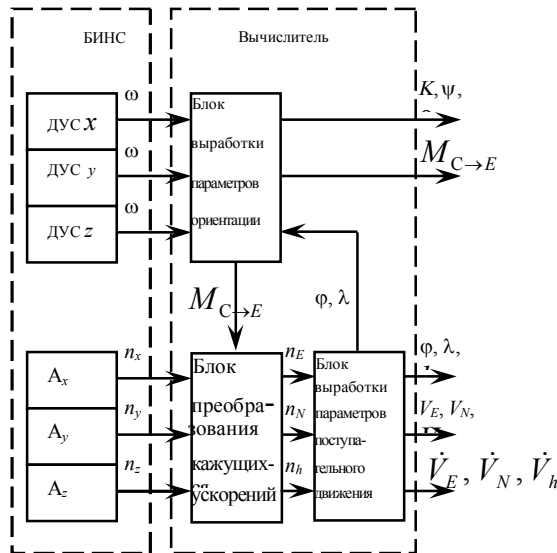


Рисунок 1 - Схема построения связей при решении навигационной задачи

Исходной информацией для выработки выходных данных навигационной задачи являются:

составляющие n_x, n_y, n_z вектора \vec{n} кажущегося ускорения;

составляющие $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ вектора ω угловой скорости вращения трехгранника $x_b y_b z_b$ на свои оси.

Выходной информацией являются:

$K, \psi, \theta, \dot{K}, \dot{\psi}, \dot{\theta}$ – углы курса, продольных и боковых колебаний ПО, определяющие взаимную ориентацию ССК xuz и горизонтного трехгранника ENh , а также скорости их изменения;

$V_E, V_N, V_h, \dot{V}_E, \dot{V}_N, \dot{V}_h$ – восточная, северная и вертикальная составляющие линейной скорости и ускорения ПО относительно Земли,;

ϕ, λ, h – широта, долгота и высота места ПО.

Реализация в вычислителе состоит из следующих последовательных действий[3]

1. Ввод начальных условий

2. Определение начальных значений компонентов матрицы $M_{C \rightarrow E}(t_0)$ перевода из ССК в геодезическую СК ENh

$$= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

3. Расчет элементов начальной косо-симметрической матрицы $\tilde{\omega}_\gamma(t_0)$

$$\tilde{\omega}_\gamma = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_h & \omega_N \\ \omega_h & 0 & -\omega_E \\ -\omega_N & \omega_E & 0 \end{bmatrix}$$

4. Съём текущих измерений ДУСов $\omega_x, \omega_y, \omega_z(t)$.

5. Интегрирование матричного уравнения Пуассона для определения компонентов матрицы $M_{C \rightarrow E}(t)$:

$$\dot{M}_{C \rightarrow E} = M_{C \rightarrow E} \tilde{\omega}_\gamma - \tilde{\omega}_\gamma M_{C \rightarrow E} \quad \text{при начальных условиях } M_{C \rightarrow E}(t_0), \quad (2)$$

3. Вычисление текущих значений компенсационных ускорений a_E, a_N, a_h по осям геодезической СК ENh . При этом в расчетах используем значения $\phi, \lambda, V_N, V_E, R\phi, R\lambda$, полученные на предыдущем шаге.

3. Съём измерений акселерометров $n_x, n_y, n_z(t)$.

4. Вычисление ускорений в геодезической СК ENh :

$$\begin{pmatrix} n_E \\ n_N \\ n_h \end{pmatrix} = M_{C \rightarrow E}(t) \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_E &= n_E - a_E; \\ \dot{V}_N &= n_N - a_N; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dot{V}_h = n_h - a_h.$$

7. Вычисление скоростей в СК ENh на интервале решения:

$$V_E(t) = V_E(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_E(\tau) d\tau;$$

$$V_N(t) = V_N(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_N(\tau) d\tau; \quad (5)$$

$$V_h(t) = V_h(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_h(\tau) d\tau.$$

8. Определение координат местоположения ПО:

$$\varphi(t) = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_N(\tau)}{R_\varphi(\tau)} d\tau;$$

$$\lambda(t) = \lambda(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_E(\tau)}{R_\lambda(\tau) \cos \varphi(\tau)} d\tau; \quad (6)$$

$$h(t) = h(t_0) + \int_{t_0}^t V_h(\tau) d\tau.$$

9. Расчет элементов кососимметрической матрицы по текущим значениям параметров

$$\omega_E(t) = -\frac{V_N(t)}{R_\varphi(t)};$$

$$\omega_N(t) = \Omega \cos \varphi(t) + \frac{V_E(t)}{R_\lambda(t)}; \quad (7)$$

$$\omega_h(t) = \Omega \sin \varphi(t) + \frac{V_E(t)}{R_\lambda(t)} \operatorname{tg} \varphi(t).$$

Полученные значения используются в цикле решения задачи, далее цикл повторяется.

Навигационное решение, полученное по описанному выше алгоритму согласовывается с навигационным решением, полученным из СНС (рисунок 1). Для этого применяется фильтр Калмана для реализации которого необходимо знание моделей погрешности чувствительных элементов и кавариационная матрица. В данной системе используется 18 параметров на входе фильтра. Отладка ПО гибридной НС потребовала разработки специального комплексного стенда.

Моделируемый объект (автомобиль) движется по трассе, рельеф которой и координаты в каждой точке определяются ее моделью. Трасса жестко связана с моделью ландшафта, которая позволяет сформировать вид из окон автомобиля, соответствующий координатам автомобиля на трассе.

Координаты из модели трассы передаются в модель приемника ГЛОНАСС, который

позволяет трансформировать точные координаты в принятые координаты ГЛОНАСС (псевдодальность, псевдоскорость, псевдофазу) с учетом погрешностей тропосферы, неточностей орбит спутников, ошибок синхронизации.

Кроме того, модель трассы дает входные данные для модели динамики автомобиля. Процесс движения автомобиля по трассе – это взаимодействие Модели динамики автомобиля, Модели Трассы, Модели ландшафта, Программы отображения и Модели пилота и Программы поездки (или самого пилота).

Остальные блоки работают также в режиме реального времени, но являются системами наблюдения, т.е. регистрирующими параметры движения, и именно их точность проверяется на стенде.

Для исследования динамики автомобиля по пути с заданной неровностью и с учетом его маневрирования в плане разработана математическая модель динамики автомобиля [3]. Модель построена таким образом, что если заданы параметры, определяющие эволюцию автомобиля в плане и неровность дороги, то модель позволяет определить все компоненты движения автомобиля.

При построении математической модели динамики автомобиля руководствуемся следующим принципом: математическая модель должна в необходимой степени отражать исследуемые процессы и их характеристики, при этом ее сложность и размерность должны быть минимальными [1-4].

В соответствие с выбранной системой координат положительными считаются:

- движение вперед $x(t)$;
- параллельное смещение влево $y(t)$;
- параллельное смещение вверх $z(t)$;
- угол поворота вокруг продольной оси, соответствующий левому крену корпуса (подъему правой стороны корпуса) $\varphi_x(t)$;
- угол поворота вокруг поперечной оси, соответствующий движению на подъем $\varphi_y(t)$;
- угол поворота вокруг вертикальной оси, соответствующий левому повороту $\varphi_z(t)$.

Ускорения W_n, W_τ , возникающие при эволюциях автомобиля в плане, создают силы инерции, которые прилагаются к центру масс кузова.

Движение модели описывается системой дифференциальных уравнений:

РАЗДЕЛ V. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ.

$$\begin{aligned}
 & m\ddot{z} + 2b_1(\dot{z} + \dot{\varphi}_y L_1) + \\
 & 2b_2(\dot{z} - \dot{\varphi}_y L_2) + \\
 & 2c_1(z + \varphi_y L_1) + \\
 & 2c_2(z - \varphi_y L_2) = \\
 & b_1(\dot{\eta}_{11} + \dot{\eta}_{12}) + \\
 & b_2(\dot{\eta}_{21} + \dot{\eta}_{22}) + \\
 & c_1(\eta_{11} + \eta_{12}) + \\
 & c_2(\eta_{21} + \eta_{22}); \\
 \\
 & J_y \ddot{\varphi}_y + 2b_1 L_1 (\dot{\varphi}_y L_1 + \dot{z}) + \\
 & 2b_2 L_2 (\dot{\varphi}_y L_2 - \dot{z}) + \\
 & 2c_1 L_1 (\varphi_y L_1 + z) + \\
 & 2c_2 L_2 (\varphi_y L_2 - z) = \\
 & b_1 L_1 (\dot{\eta}_{11} + \dot{\eta}_{12}) - \\
 & b_2 L_2 (\dot{\eta}_{21} + \dot{\eta}_{22}) + \\
 & c_1 L_1 (\eta_{11} + \eta_{12}) - \\
 & c_2 L_2 (\eta_{21} + \eta_{22}) + h w_\tau m; \\
 \\
 & J_x \ddot{\varphi}_x + 2(b_1 + b_2) \dot{\varphi}_x L_k^2 + \\
 & 2(c_1 + c_2) \varphi_x L_k^2 = \\
 & b_1 L_k (\dot{\eta}_{11} - \dot{\eta}_{12}) + \\
 & b_2 L_k (\dot{\eta}_{21} - \dot{\eta}_{22}) + \\
 & c_1 L_k (\eta_{11} - \eta_{12}) + \\
 & c_2 L_k (\eta_{21} - \eta_{22}) - h w_n m.
 \end{aligned} \tag{8}$$

где m, J_y, J_x – масса и моменты инерции кузова относительно осей, проходящих через центр масс;

η_{ij} – вертикальное кинематическое возмущение со стороны пути ($i = 1, 2; j = 1, 2$) под каждым колесом;

w_n, w_τ – кинематические нормальное (поперечное) и тангенциальное (продольное) ускорения центра масс кузова.

Пусть движение автомобиля вдоль траектории S задается координатами $x_1 = x_1(t)$ и $y_1 = y_1(t)$, которые являются дифференцируемыми функциями времени. Тогда для определения скоростей v , ускорений w , а также w_n и w_τ справедливы следующие соотношения:

$$v = \sqrt{\left(\frac{dx_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_1}{dt}\right)^2} = \sqrt{v_{x1}^2 + v_{y1}^2}; \tag{9}$$

$$w = \sqrt{\left(\frac{d^2x_1}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y_1}{dt^2}\right)^2} = \sqrt{w_{x1}^2 + w_{y1}^2}; \tag{10}$$

$$\sin \alpha = \frac{v_{y1}}{v}; \quad \cos \alpha = \frac{v_{x1}}{v}; \quad \sin \beta = \frac{w_{y1}}{w};$$

$$\cos \beta = \frac{w_{x1}}{w}; \tag{11}$$

$$w_\tau = w_x = w \cos(\beta - \alpha) = \frac{w_{x1} v_{x1} + w_{y1} v_{y1}}{|v|};$$

$$w_n = w_y = w \cos\left[\beta - \left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)\right] = \frac{w_{y1} v_{x1} - w_{x1} v_{y1}}{|v|},$$

где α и β – углы между векторами v , w и осью абсцисс неподвижной системы координат.

При заданных функциях $x_1 = x_1(t)$, $y_1 = y_1(t)$ и $\eta_{ij}(t)$ из системы (8) могут быть найдены функции $z(t)$, $\varphi_x(t)$, $\varphi_y(t)$ и их производные.

Путь, пройденный автомобилем по криволинейной траектории, определяется из соотношения:

$$S(t) = \int_0^t \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2} dt.$$

Таким образом, если заданы параметры, определяющие эволюцию автомобиля в плане и неровность дороги, построенная математическая модель позволяет определить все компоненты движения автомобиля.

Блоки стенда, моделирующие инерциальный вычислитель и чувствительные элементы ИНС (акселерометры (А) и гироскопы - датчики угловой скорости (ДУС)) описываются своими отдельными алгоритмами. Под задачей инерциальной навигации [4] понимается определение местоположения и скорости подвижного объекта (ПО) как материальной точки в принятой системе координат по ин-

формации от инерциальных датчиков – А и ДУС.

Акселерометры измеряют вектор кажущегося ускорения ПО. ДУС предназначены для определения ориентации ПО.

Исходной информацией для выработки выходных данных навигационной задачи являются ускорения по осям и угловые скорости вращения системы координат, связанной с автомобилем.

Выходной информацией являются углы курса, продольных и боковых колебаний ПО, восточная, северная и вертикальная составляющие линейной скорости и ускорения ПО относительно Земли, а также широта, долгота и высота места ПО.

Для исследования характеристик реальных акселерометров и ДУС разработан специальный стенд с компьютерным управлением, на подвижную платформу которого устанавливаются чувствительные элементы ИНС, а управляющие двигатели управляются от модели трассы.

При создании стенда предлагается применить поворотную платформу, вращающуюся по трем осям. Вращение осуществляется шаговыми двигателями. Управление двигателями осуществляется микропроцессорной системой управления, подключенной к персональному компьютеру посредством интерфейса USB.

Полностью укомплектованный стенд позволяет проводить имитацию длительного движения автомобиля по трассе, при этом воспроизводить ландшафт, реагировать на управляющие воздействия пилота, задавать реальные угловые ускорения на чувствительные элементы ИНС в реальном масштабе времени, эмулировать сигналы системы ГЛОНАСС с учетом погрешностей атмосферы, получать навигационные решения как

ИНС, так и ГНС и определять погрешность этих решений.

Разработанная гибридная НС позволяет осуществлять навигационное решение с точностью до двух метров при дифференциальной коррекции и осуществлять инерциальную навигацию как мин в течение 5 минут при отсутствии наблюдаемых спутников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазур в. в. Математическая модель силового баланса автомобиля при движении по дороге с неровным микропрофилем./ Проблемы механики и машиноведения, №2, 2005. – с.29-32.
2. П.А. Коропец Математическая модель для исследования динамики транспортных средств. Рассеяние электромагнитных волн: Межвед. Сб. научн.-техн. Статей.- Вып 16/ Под ред. Ю.В. Юханова. – Таганрог: ТТИ ЮФУ.2010.-229с.
3. Щербань И.В., Литвяков И.А., Толмачев С.А. Алгоритм определения навигационных параметров подвижного объекта по показаниям БИНС// Перспективы развития навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo: материалы Международной научно-технической конференции – Донецк, ДонНТУ, 2010.
4. Степанов О.А. Особенности построения и перспективы развития навигационных инерциально-спутниковых систем. / Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. Сб. статей докл. С.-Пб. 2001г.
5. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука, 1979.

Доцент, к.т.н. С.А. Синютин тел. 8(8634)311143, ssin@mail.ru – каф. Микропроцессорных систем Таганрогского технологического института южного федерального университета