

УДК 629.735-519:629.7.058.47

РАЗРАБОТКА ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРУЮЩЕГО СТЕНДА ДИНАМИКИ ПОЛЕТА МАЛОРАЗМЕРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА. СТРУКТУРА СТЕНДА И ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СИСТЕМ КООРДИНАТ

В.Н. Биш, А.Н. Пальцев, В.Н. Рыльков, Ю.Ф. Яцына

Полунатурный моделирующий стенд динамики полета малоразмерного беспилотного летательного аппарата (БЛА) предназначен для исследования динамических свойств легких БЛА малого радиуса действия (от 10 до 70 км), отладки программного обеспечения и доводки бортового оборудования. В дальнейшем рассматриваемый стенд может быть положен в основу при разработке математической модели БЛА среднего радиуса действия (от 70 до 150 (250) км) согласно современной российской классификации [1].

В состав стенда входят следующие функциональные модули:

- программно-математический модуль (ПММ) пространственного движения БЛА;
- программные имитаторы датчиков температуры внутри корпуса ПНК, линейных ускорений (ДЛУ), угловых скоростей (ДУС);
- программные имитаторы приемника GPS, системы воздушных сигналов (СВС), магнитометра, датчиков температуры за бортом БЛА и атмосферного давления;
- пилотажно-навигационный комплекс (ПНК);
- наземный пункт управления (НПУ).

Структурно-функциональная схема стенда представлена на рис. 1.

Полетное задание (ПЗ) и команды управления (КУ) формируются оператором на НПУ и подаются в блок траекторного управления ПНК. При этом на вход ПММ поступают данные об установленном режиме полета.

Входными управляющими сигналами для ПММ являются шим-сигналы u_v , u_ω , u_n , $u_{дв}$, формируемые в ПНК и пропорциональные углам отклонения органов управления полетом, а также величине оборотов двигателя для выдерживания заданной скорости полета.

Выходными параметрами ПММ являются навигационные и пилотажные параметры полета математической модели БЛА, полученные в процессе интегрирования уравнений пространственного движения, а также моделируемые характеристики атмосферы и температура ПНК.

Выходные параметры ПММ поступают на вход имитаторов датчиков, где к их значениям добавляются «шумы». Далее информация в виде «зашумленных» значений параметров поступает:

- в блок ориентации бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) от имитаторов датчиков температуры ПНК, линейных ускорений (ДЛУ) и угловых скоростей (ДУС);
- в блок комплексирования параметров навигации от имитаторов приемника GPS, системы воздушных сигналов (СВС), магнитометра, температуры за бортом и атмосферного давления.

Скомплексированные параметры и вычисленные в блоке ориентации БИНС углы Эйлера (ϑ, γ, ψ) выдаются в блок траекторного управления ПНК, осуществляющий расчет заданных и текущих значений высоты, путевой скорости, угла рыскания, а также текущих значений воздушной скорости, угла атаки, угла тангажа, угловой скорости и ускорения тангажа, угла крена и угловой скорости крена.

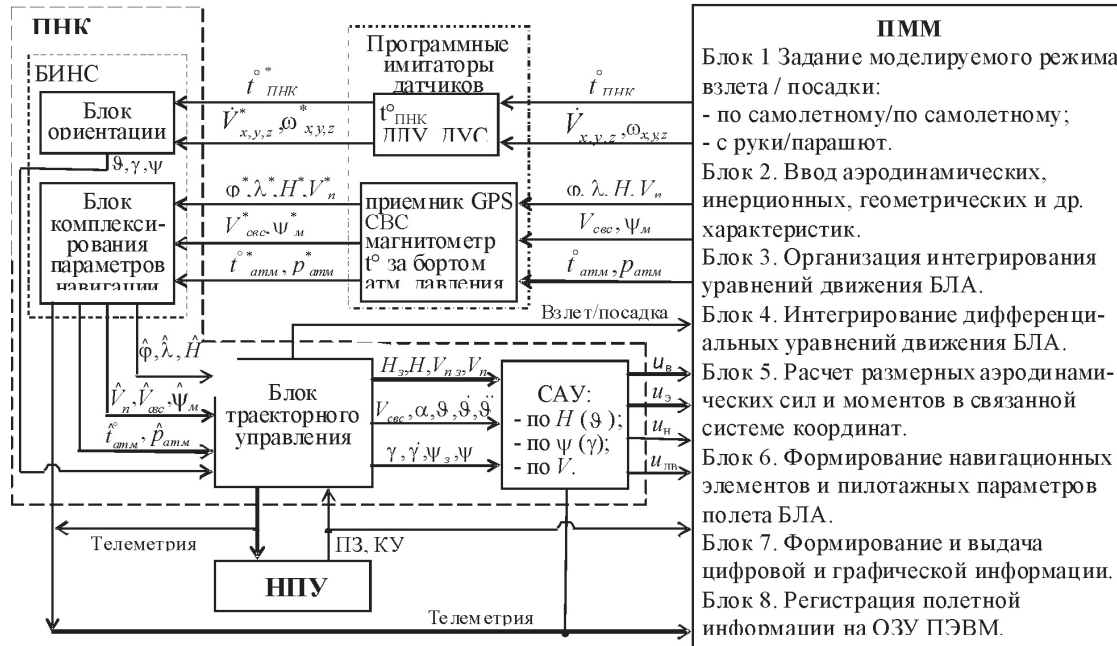


Рис. 1. Структурно-функциональная схема стенда динамики полета БЛА

Значения данных параметров подаются на вход САУ, решающей в составе ПНК две подзадачи управления:

- стабилизация параметров пространственной ориентации, высоты полета БЛА и повышения его устойчивости и управляемости;
- навигация, т.е. точное, надежное и безопасное управление полетом БЛА из одной точки земной поверхности в другую при координатной поддержке от системы спутниковой навигации GPS.

Полетная информация, поступающая от блоков комплексирования параметров навигации, траекторного управления и САУ ПНК, регистрируется в ОЗУ ПЭВМ.

Рассматриваемый ПММ представляет собой математическую модель пространственного движения БЛА, описывающую собственные динамические свойства самолета, т.е. при отсутствии бортовой системы автоматического управления (САУ), которая входит в состав ПНК.

Для описания пространственного движения БЛА используются следующие системы координат (СК) [2–4]: географическая СК; нормальная земная (неподвижная) СК; нормальная (подвижная) СК; связанная СК; скоростная СК; траекторная СК; ортодромическая СК.

При дальнейшем изложении будут описаны основные правила перехода между используемыми СК.

Поскольку GPS сообщает координаты в системе среднего эллипсоида WGS 84 (World Geodetic System 1984) [2], данная система координат выбрана в качестве базовой.

GPS-приемник, установленный на БЛА, определяет геоцентрические (географические — без учета уклонения отвесных линий) координаты текущего местоположения антенны приемника: широту ϕ , долготу λ и высоту h [5]. Широта определяется углом, образуемым нормалью к земному сфероиду и плоскостью экватора Земли. Долготу измеряют двугранным углом между плоскостью меридиана, проходящего через точку O , и плоскостью Гринвичского меридиана (рис. 2).

Нормальная земная СК $O_o X_g Y_g Z_g$ (рис. 2) — правая прямоугольная декартова система координат, начало которой O_o совмещено с точкой земной поверхности, ось $O_o Y_g$ направлена вверх по местной вертикали, а направление осей $O_o X_g, O_o Z_g$ неизменно относительно Земли и выбирается в соответствии с задачей. В рассматриваемой задаче построения ПММ начало нормальной земной СК O_o совмещено с точкой старта, ось $O_o X_g$ направлена на север по касательной к меридиану, ось $O_o Z_g$ ориентирована по касательной к параллели на восток, а ось $O_o Y_g$ — вдоль вертикали места вверх.

Нормальная СК $O X_g Y_g Z_g$ — подвижная система координат, начало которой O совмещено с центром масс БЛА, а оси этой системы имеют то

же направление, что и оси в нормальной земной СК (в частности, параллельно осям нормальной земной СК при относительно небольших расстояниях между точками O и O_0). В дальнейшем будем полагать, что оси нормальной и нормальной земной СК параллельны. Относительное положение этих СК определяется вектором r между их началами, как это показано на рис. 2. Проекция вектора r на ось OY_g называется геометрической высотой полета h .

Поскольку оси нормальной СК ориентированы по сторонам света, а точка O перемещается вместе с БЛА, такая система координат называется географическим сопровождающим трехгранником [6], который вращается с абсолютной угловой скоростью, обусловленной переносной угловой скоростью вращения Земли $U = 0,04-17$ град/с и относительной скоростью вращения вследствие перемещения БЛА вдоль земной поверхности. Относительная скорость вращения трехгранника складывается из угловой скорости вращения $\dot{\lambda}$ вокруг оси вращения Земли при движении БЛА вдоль параллели ($\varphi = const$)

$$\dot{\lambda} = \frac{v_{Zg}}{\rho} = \frac{V_{Zg}}{(R+h)\cos\varphi} \quad (1)$$

и угловой скорости вращения $\dot{\varphi}$ вокруг оси Z_g при движении БЛА в плоскости меридиана ($\lambda = const$)

$$\dot{\varphi} = \frac{V_{Xg}}{R+h}, \quad (2)$$

где ρ — радиус соответствующей параллели, $R = 6378137$ м — геоцентрический радиус Земли, h — геометрическая высота полета БЛА.

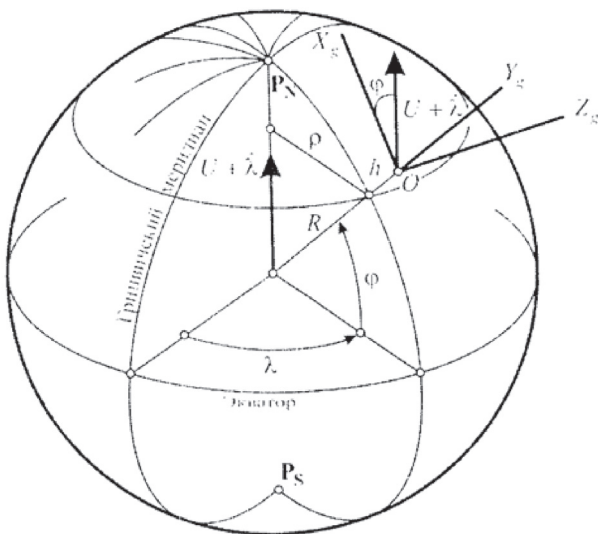


Рис. 2. Географические координаты точки

Если точка O перемещается с линейной скоростью V относительно поверхности Земли, то проекции вектора V на оси географического трехгранника имеют вид (рис. 3)

$$V_{Xg} = V_r \cos K, \quad V_{Yg} = \dot{h}, \quad V_{Zg} = V_r \sin K. \quad (3)$$

где V_r — горизонтальная составляющая скорости БЛА, K — курсовой угол, т.е. угол между направлением на север и вектором V_r .

Проекции абсолютной угловой скорости географического трехгранника на его оси равны [6]

$$\omega_{Xg} = (U + \dot{\lambda}) \cos \varphi;$$

$$\omega_{Yg} = (U + \dot{\lambda}) \sin \varphi; \quad \omega_{Zg} = -\dot{\varphi}, \quad (4)$$

а с учетом соотношений (1) и (2)

$$\omega_{Xg} = U \cos \varphi + \frac{V_{Zg}}{R+h};$$

$$\omega_{Yg} = U \sin \varphi + \frac{V_{Zg}}{R+h} \operatorname{tg} \varphi; \quad \omega_{Zg} = -\frac{V_{Xg}}{R+h}. \quad (5)$$

Связанная СК — подвижная система координат $OXYZ$, осями которой являются фиксированные относительно летательного аппарата (ЛА) продольная ось OX , нормальная ось OY , расположенные в плоскости симметрии БЛА и поперечная ось OZ , перпендикулярная плоскости симметрии, а начало координат O совмещено с центром масс (рис. 4). Переход от нормальной системы координат к связанной СК осуществляется последовательными поворотами на угол рыскания ψ вокруг оси OY_g , на угол тангажа ϑ вокруг нового положения оси OZ_g и на угол крена γ вокруг оси OX (рис. 4, а). Здесь же показаны векторы скоростей изменения этих углов. Использование углов Эйлера опирается на предположение, что $\vartheta \neq \pm \pi/2$, в противном случае векторы $\dot{\psi}$ и $\dot{\gamma}$ «складываются» и описанный способ определения относительного углового положения теряет смысл.

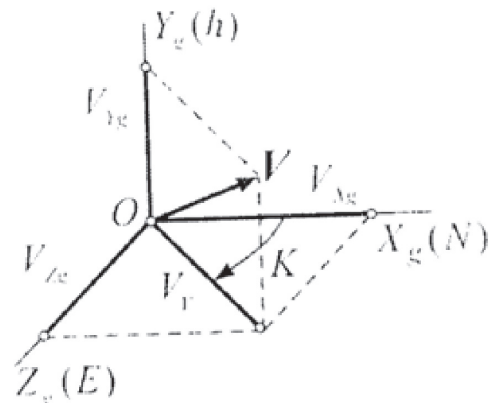


Рис. 3. Проекция вектора V на оси географического трехгранника

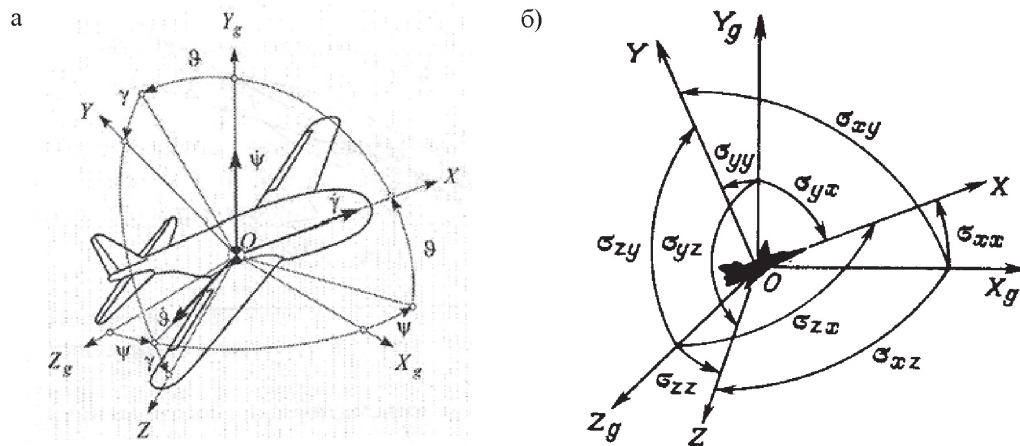


Рис. 4. Нормальная и связанная СК:
а — углы Эйлера; б — направляющие косинусы

Взаимная ориентация рассматриваемых систем координат однозначно определяется девятью направляющими косинусами, т.е. косинусами девяти углов между соответствующими осями связанной и нормальной СК (рис. 4, б).

Связь направляющих косинусов с углами Эйлера представлена в табл. 1 [4].

Направляющие косинусы удобно представлять в виде матрицы перехода от связанной к нормальной СК (матрицы вращения)

$$D_H^{cb} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Вследствие ортогональности матрицы вращения (ее обращение эквивалентно транспонированию) обратный переход от нормальной к связанной СК осуществляется с помощью транспонирования матрицы (6)

$$D_{cb}^H = [D_H^{cb}]' = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{yx} & \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{zy} \\ \epsilon_{xz} & \epsilon_{yz} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где штрихом обозначена операция транспонирования.

Скоростная система координат — подвижная система координат $OX_a Y_a Z_a$, начало которой O находится в центре масс ЛА, ось OX_a совпадает с направлением скорости \vec{V} (скоростная ось), ось OY_a лежит в плоскости симметрии OXY (ось подъемной силы), а ось OZ_a (боковая ось) дополняет две предыдущие до правого трехгранника осей (рис. 5). Положение связанной СК относительно скоростной определяется углами атаки α и скольжения β . Угол β образован осью OX_a (направлением скорости) и плоскостью симметрии ЛА, а угол α образован продольной осью OX и проекцией оси OX_a (скорости \vec{V}) на плоскость симметрии. Эти аэродинамические углы и компоненты воздушной скорости в связанной СК подчинены соотношениям

$$\alpha = -\arctg \frac{V_y}{V_x}; \quad \beta = \arctg \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}. \quad (8)$$

Матрица перехода от скоростной к связанной СК имеет вид

Таблица 1

Оси нормальной СК	Оси связанной СК		
	OX	OY	OZ
OX_g	$\epsilon_{xx} = \cos\sigma_{xx} = \cos\psi \cos\vartheta$	$\epsilon_{xy} = \cos\sigma_{xy} = \sin\gamma \sin\psi - \cos\gamma \cos\psi \sin\vartheta$	$\epsilon_{xz} = \cos\sigma_{xz} = \cos\gamma \sin\psi + \sin\gamma \cos\psi \sin\vartheta$
OY_g	$\epsilon_{yx} = \cos\sigma_{yx} = \sin\vartheta$	$\epsilon_{yy} = \cos\sigma_{yy} = \cos\gamma \cos\vartheta$	$\epsilon_{yz} = \cos\sigma_{yz} = -\sin\gamma \cos\vartheta$
OZ_g	$\epsilon_{zx} = \cos\sigma_{zx} = -\sin\psi \cos\vartheta$	$\epsilon_{zy} = \cos\sigma_{zy} = \sin\gamma \cos\psi + \cos\gamma \sin\psi \sin\vartheta$	$\epsilon_{zz} = \cos\sigma_{zz} = \cos\gamma \cos\psi - \sin\gamma \sin\psi \sin\vartheta$

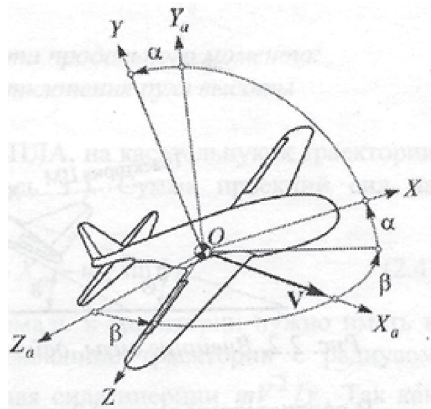


Рис. 5. Связанная и скоростная СК

$$D = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha & -\cos \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Траекторная система координат $OX_k Y_k Z_k$ — подвижная система координат, начало которой O находится в центре масс ЛА, ось OX_k совпадает с направлением земной скорости \vec{V}_k , ось OZ_k лежит в горизонтальной плоскости, а ось OY_k расположена в вертикальной плоскости, проходящей через ось OX_k , и направлена обычно вверх от поверхности Земли.

Относительное положение траекторной и нормальной СК показано на рис. 6. Угол между осью OX_g и вертикальной плоскостью, проходящей через ось OX_k , называется углом пути Ψ . Угол между осью OX_k и горизонтальной плоскостью называется углом наклона траектории θ .

Матрица перехода от траекторной к нормальной СК имеет вид [7]

$$D_H^T = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \Psi & -\sin \theta \cos \Psi & \sin \Psi \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta \sin \Psi & \sin \theta \sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Относительное положение векторов земной скорости

$$\vec{V}_k = [V_{kxg} \quad V_{kyg} \quad V_{kzg}]' \quad (11)$$

и воздушной скорости ЛА

$$\vec{V} = [V_x \quad V_y \quad V_z]' \quad (12)$$

определяется скоростью воздушной массы относительно поверхности Земли, т.е. вектором скорости ветра \vec{W} , который задается проекцией на оси нормальной СК

$$\vec{W} = [W_{xg} \quad W_{yg} \quad W_{zg}]'. \quad (13)$$

Заметим, что введенные матрицы перехода осуществляют все возможные переходы от одной из

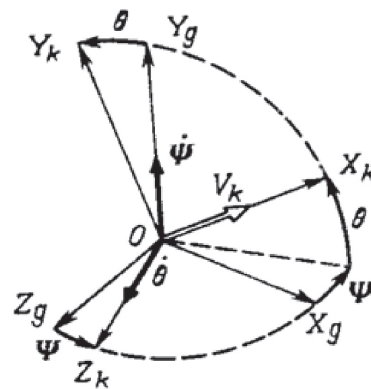


Рис. 6. Нормальная и траекторная системы координат

перечисленных СК к другой. Так, переход от траекторной к скоростной СК осуществляется матрицей

$$D_C^T = D_C^e D_C D_H^T, \quad (14)$$

элементы которой образуются по правилу перемножения указанных матриц.

Ортодромическая СК — образуется построением условного (ортодромического) экватора — главной ортодромии с таким расчетом, чтобы она проходила в секторе предстоящих полетов через точку вылета (ТВ). При этом направление главной ортодромии в сторону очередного поворотного пункта маршрута (ППМ1) считается положительным. Сферические перпендикуляры, восстановленные к главной ортодромии, образуют сетку ортодромических меридианов и пересекаются в полюсах ортодромической системы координат. В навигации используют два вида ортодромической СК: левую и правую. Рассмотрим левую ортодромическую СК (рис. 7).

Основной плоскостью отсчета является плоскость условного экватора, в которой лежит линия ортодромии — дуга большого круга на поверхности земной сферы, проходящая через начальную и конечную точки маршрута.

Ортодромия обладает следующими свойствами:

- является линией кратчайшего расстояния между точками на поверхности земного шара;
- пересекает меридианы под различными неравными между собой углами вследствие схождения меридианов у полюсов.

Условный экватор этой системы представляет собой координатную ось OY на поверхности земной сферы. Другая координатная ось OX направлена под углом 90° к оси влево от положительного направления OY . Ось OX — начальный ортодромический меридиан. Положение точки на сфере определяется ортодромическими широтой x и долготой y .

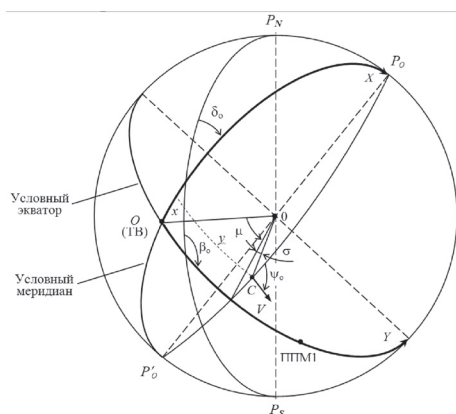


Рис. 7. Ортодромическая система координат

Ортодромическая долгота y определяется длиной дуги ортодромического экватора от начального ортодромического меридиана OX до ортодромического меридиана точки C . Ортодромическая долгота может выражаться в линейной или угловой мере: $\mu = 57,3^\circ y R^{-1}$, где R — радиус сферы (6378,137 км). Ортодромическая широта x определяется длиной дуги ортодромического меридиана от ортодромического экватора до ортодромической параллели точки или в угловой мере $\sigma = 57,3^\circ x R^{-1}$.

Курс ψ_0 БЛА и все