

УДК: 531.383

ББК: 32.816я431(2Рос)

П58

**В. М. Попов**  
**Иркутск, Россия**

## **ГИРОСТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАТФОРМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ**

В статье приведен алгоритм управления сервоприводами гиростабилизированной платформы беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для аэрофото­съемки и видеонаблюдения на основе информации трехосевого акселерометра и гироскопа, расположенных на корпусе БПЛА. Рассмотрена реализация алгоритма с использованием программируемой аппаратной платформы Arduino версии UNO и сервоприводов SG90.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, гиростабилизированная платформа, микромеханический акселерометр, микромеханический гироскоп.

**V. M. Popov**  
**Irkutsk, Russia**

## **THE GYRO STABILIZATION OF THE UNMANNED AIRCRAFT PLAT- FORM FOR AERIAL PHOTOGRAPHY AND VIDEO SURVEILLANCE**

The article presents a control algorithm for the servo drives of the gyro stabilized platform for unmanned aircraft vehicle (PUAV) for aerial photography and surveillance on the basis of the data from the 3-axis accelerometer and gyroscope located on the body of the UAV. The implementation of the algorithm using the servo SG90 with a programmable Arduino UNO hardware platform is reviewed.

**Keywords:** unmanned aircraft vehicle, gyro stabilized platform, micromechanical accelerometer, micromechanical gyroscope.

Предпосылками применения БПЛА в качестве нового инструмента для аэрофотосъемки и видеонаблюдения являются недостатки двух традиционных способов получения данных с помощью космических спутников (космическая съемка) и воздушных пилотируемых аппаратов (аэрофотосъемка). Данные спутниковой съемки позволяют получить снимки с максимальным общедоступным разрешением 0,5 м, что недостаточно для крупномасштабного картирования. Кроме того, не всегда удается подобрать безоблачные снимки из архива. В случае съемки под заказ теряется оперативность получения данных.

Традиционная аэрофотосъемка, которая проводится с помощью самолетов или вертолетов, требует высоких экономических затрат на обслуживание и заправку, что приводит к повышению стоимости конечной продукции [Зинченко, 2011].

Применение стандартных авиационных комплексов нерентабельно в следующих случаях:

- съемка небольших объектов и малых по площади территорий. В этом случае экономические и временные затраты на организацию работ, приходящиеся на единицу отснятой площади, существенно превосходят аналогичные показатели при съемке больших площадей (тем более для объектов, значительно удаленных от аэродрома);

- при необходимости проведения регулярной съемки в целях мониторинга протяженных объектов: трубопроводы, ЛЭП, транспортные магистрали.

Таким образом, плюсами применения БПЛА являются:

1. Рентабельность.
2. Возможность съемки с небольших высот и вблизи объектов.
3. Получение снимков высокого разрешения. Оперативность получения снимков.

4. Возможность применения в зонах чрезвычайных ситуаций без риска для жизни и здоровья пилотов.

В настоящее время большая часть существующих и эксплуатируемых БПЛА предназначены для воздушной разведки и наблюдения, которые осуществляются с помощью фото- и видеосъемки.

К полезной нагрузке для задач аэрофотосъемки относится цифровая фотокамера, как дополнение могут использоваться видеокамера, тепловизор, ИК-камера.

Результаты аэрофотосъемки с БПЛА могут применяться в разных областях, таких как рекламная съемка объектов недвижимости, различный мониторинг (экологический, сельскохозяйственный) и т. д.

Выполнение аэрофотосъемки с целью профессионального картографирования предъявляет повышенные требования к выходным данным, а именно, к выдерживанию геометрических параметров съемки. Небольшие БПЛА экономичны в эксплуатации и портативны, однако менее стабильны с этой точки зрения. Как следствие, блоки снимков, полученные с БПЛА, обладающие отличной детальностью, яркостью и контрастом могут иметь низкое фотограмметрическое качество с точки зрения традиционных фотограмметрических пакетов.

С этой целью необходимо на борту БПЛА иметь стабилизированную платформу, создающую необходимые условия для получения высокого качества аэрофотографирования.

### **1 АЛГОРИТМ СТАБИЛИЗАЦИИ ГИРОПЛАТФОРМЫ**

Для построения гиросtabilизированной платформы (ГСП) БПЛА необходимо использовать следующие основные блоки (*рис. 1*):

- блок акселерометров – для определения проекций вектора кажущегося ускорения  $\vec{a}$  на оси связанного трехгранника;

- блок пересчета – для преобразования проекций вектора кажущегося ускорения  $\vec{a}$  на оси географической системы координат;

- навигационный алгоритм – для выработки координат местоположения объекта и скоростей и формирования компонент вектора абсолютной угловой скорости географического трехгранника  $\vec{\omega}_g$ ;
- блок гироскопов – для определения проекций абсолютной угловой скорости  $\vec{\omega}$  на ребра связанного трехгранника;
- алгоритм ориентации – для решения задачи ориентации и формирования матрицы перехода  $C$ , используемой в блоке пересчета.

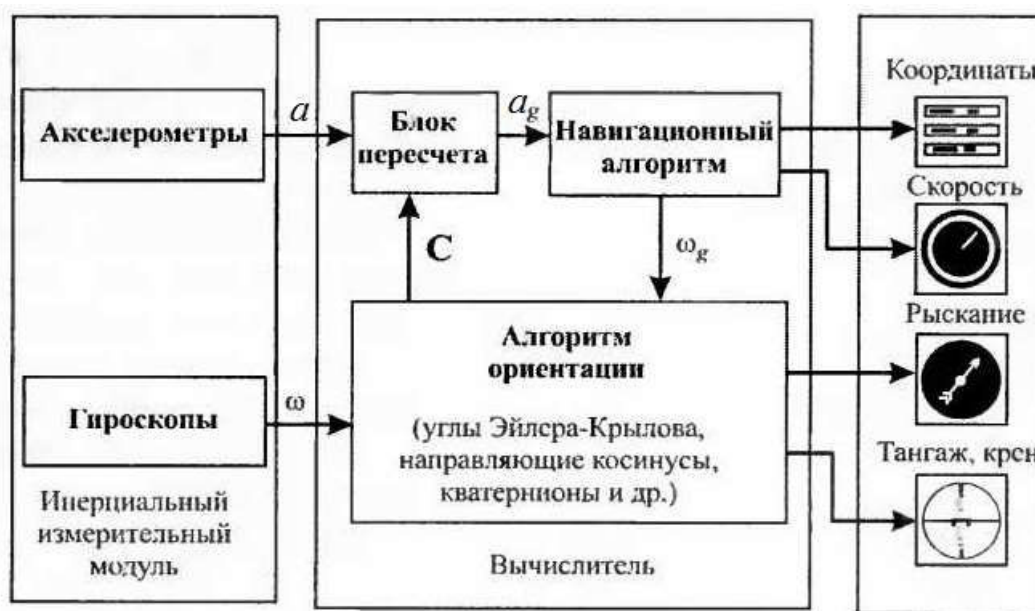


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема БИНС

Алгоритм ориентации может быть реализован с использованием различных кинематических параметров, таких, как углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы, кватернионы и др. [Матвеев, 2009].

Рассмотрим задачу определения ориентации, скорости и координат БПЛА, на котором по строительным осям жестко закреплены датчики гироскопов и акселерометров, относительно географической системы координат. Эти углы определим следующим образом (рис. 2).

Введем трехгранник OXYZ, ребра которого направим вдоль строительных осей ЛА. Положение строительных осей БПЛА (связанная система координат) относительно географического трехгранника определяется тремя углами, которые называются углами рыскания (курса)  $\psi$ , тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$ .

Введём матрицу  $A$ , которая является искомой матрицей преобразования от трёхгранника  $OXYZ$  к  $OX_gY_gZ_g$

$$A = \begin{vmatrix} \sin \vartheta & -\cos \vartheta \sin \psi \\ -\cos \gamma \cos \psi \cos \vartheta + \sin \gamma \sin \psi & \cos \gamma \cos \vartheta & \cos \gamma \sin \psi \sin \vartheta + \sin \gamma \cos \psi \\ \sin \gamma \cos \psi \sin \vartheta + \cos \gamma \sin \psi & -\sin \gamma \cos \vartheta & -\sin \gamma \sin \psi \sin \vartheta + \cos \gamma \cos \psi \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Так как в алгоритме гиросплатформы осуществляется преобразование информации из связанного трёхгранника в географическую систему координат, то необходимо рассматривать обратную матрицу

$$[X_g Y_g Z_g] = A^{-1}[XYZ].$$

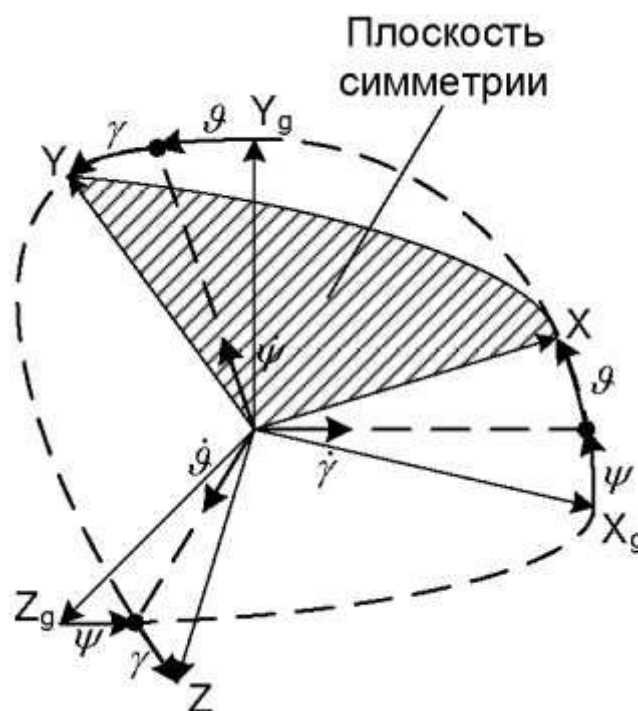


Рис. 2. Взаимное расположение связанной и географической системы координат

Матрицы направляющих косинусов ортогональны, и для них выполняется равенство

$$A^{-1} = A^T, \quad (2)$$

где  $T$  – символ транспонирования.

Введем матрицу  $C = A^T$ , которая на основании (1) имеет следующий вид

$$C = \begin{vmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & -\cos \gamma \cos \psi \cos \vartheta + \sin \gamma \sin \psi & \sin \gamma \cos \psi \sin \vartheta + \cos \gamma \sin \psi \\ \sin \vartheta & \cos \gamma \cos \vartheta & -\sin \gamma \cos \vartheta \\ -\cos \vartheta \sin \psi & \cos \gamma \sin \psi \sin \vartheta + \sin \gamma \cos \psi & -\sin \gamma \sin \psi \sin \vartheta + \cos \gamma \cos \psi \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, матрица  $C$  осуществляет переход от связанного трехгранника  $OXYZ$  к географическому  $OX_g Y_g Z_g$ .

Абсолютная угловая скорость вращения трехгранника  $OX_g Y_g Z_g$  складывается из переносной скорости вращения Земли вокруг своей оси и относительной скорости перемещения ЛА с путевой скоростью  $V_n$ :

$$\vec{\omega}_0 = \vec{\omega}_{\text{пер}} + \vec{\omega}_{\text{отн}}. \quad (4)$$

Проекции вектора абсолютной угловой скорости связанного трехгранника на свои рёбра в соответствии с последовательностью поворотов могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{vmatrix} = A_\gamma A_\vartheta A_\psi \begin{vmatrix} \omega_{Xg} \\ \omega_{Yg} \\ \omega_{Zg} \end{vmatrix} + A_\gamma A_\vartheta \begin{vmatrix} 0 \\ \dot{\psi} \\ 0 \end{vmatrix} + A_\gamma \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\vartheta} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \dot{\gamma} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где  $A_\gamma A_\vartheta A_\psi = C^T$ ,  $\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$ ,  $A_\gamma = \begin{vmatrix} 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{vmatrix}$ ,  $A_\vartheta = \begin{vmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta & 0 \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ ,  $A_\psi = \begin{vmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{vmatrix}$

$$\begin{vmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{vmatrix} = C^T \begin{vmatrix} \omega_{Xg} \\ \omega_{Yg} \\ \omega_{Zg} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \dot{\gamma} + \dot{\psi} \sin \vartheta \\ \dot{\vartheta} \sin \gamma + \dot{\psi} \cos \gamma \cos \vartheta \\ -\dot{\psi} \sin \gamma \cos \vartheta + \dot{\vartheta} \cos \gamma \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Первое слагаемое правой части (6) представляет собой переносную угловую скорость связанного трехгранника, а второе – относительную. Для определения параметров ориентации гиросплатформы необходимо алгоритмически скомпенсировать составляющие переносной угловой скорости, вызванной вращением Земли и перемещением ЛА вдоль ее поверхности.

Проекции абсолютной угловой скорости вращения трехгранника на его оси:

$$\begin{aligned}\omega_{Xg} &= (\Omega + \dot{\lambda}) \cos \varphi; \\ \omega_{Yg} &= (\Omega + \dot{\lambda}) \sin \varphi; \\ \omega_{Zg} &= -\dot{\varphi}.\end{aligned}\quad (7)$$

Вектор угловой скорости Земли  $\Omega$  имеет следующие проекции на оси географической системы координат (рис. 3, б):

$$\Omega_{Xg} = \Omega \cos \varphi, \quad \Omega_{Yg} = \Omega \sin \varphi, \quad \Omega_{Zg} = 0, \quad (8)$$

где  $\Omega_{Xg}$ ,  $\Omega_{Yg}$  – горизонтальная и вертикальная составляющие угловой скорости Земли.

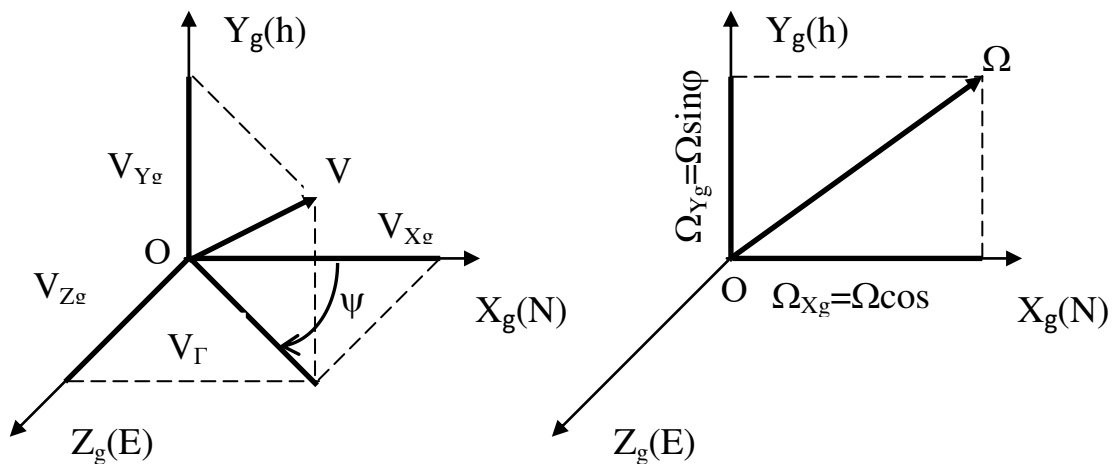


Рис. 3. Проекции векторов линейной скорости объекта (а) и угловой скорости Земли (б) на ребра географического трехгранника

Горизонтальная составляющая угловой скорости Земли  $\Omega \cos \varphi$  приводит к вращению плоскости горизонта, причем, если наблюдать это вращение с положительного направления оси  $OX$ , то восточная часть плоскости горизонта будет опускаться, а западная – подниматься. Вертикальная составляющая угловой скорости Земли  $\Omega \sin \varphi$  приводит к вращению плоскости горизонта вокруг местной вертикали против часовой стрелки, если наблюдать за вращением с положительного направления  $OY_g$  (рис. 3, б).

Скорость изменения долготы, определяемую по параллели (рис. 4, а) можно представить через восточную составляющую линейной скорости объекта

$$\dot{\lambda} = \frac{V_{Z_g}}{(R_1 + h) \cos \varphi}, \quad (9)$$

где для эллипса Красовского (рис. 4)  $R_1 = a / \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)}$ ;

$a$  – большая полуось земного сфероида – радиус окружности экватора ( $a = 6\,378\,245$  м);

$b$  – малая полуось земного сфероида ( $b = 6\,356\,863$  м).

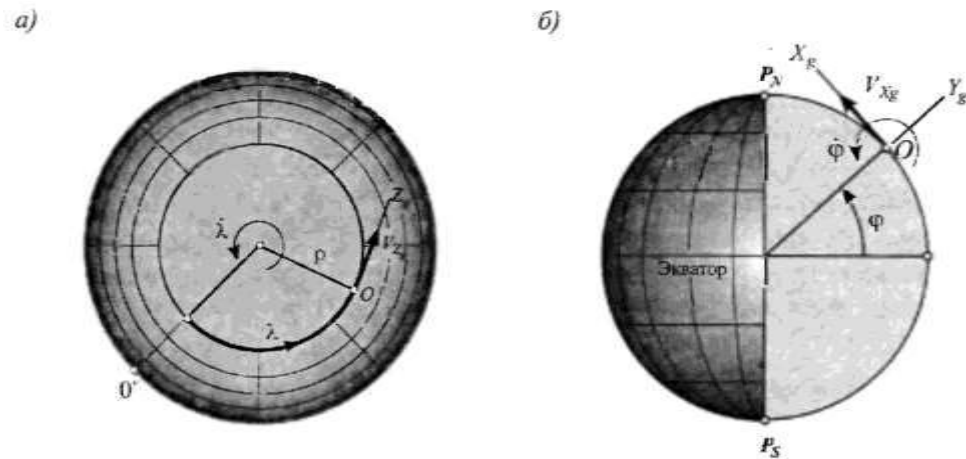


Рис. 4. Угловые скорости: (а)  $\dot{\lambda}$ ; (б)  $\dot{\varphi}$

Если объект перемещается в плоскости меридиана, то долгота остается постоянной, а приращение широты в единицу времени можно рассматривать как угловую скорость вращения трехгранника  $OX_g Y_g Z_g$  вокруг оси  $Z_g$  (рис. 4, б).

Вектор угловой скорости  $\dot{\varphi}$  направлен в отрицательную сторону оси  $OZ_g$ , т. е. на запад, а его модуль равен

$$\dot{\varphi} = \frac{V_{X_g}}{R_2 + h}, \quad (10)$$

где  $R_2 = a(1 - e^2) / \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^3}$ ,  $e^2 = (a^2 - b^2) / a^2$ .

Подставив (9) и (10) в (8), получим:



$$\left. \begin{aligned} \omega_{Xg} &= \Omega \cos \varphi + \frac{V_{Xg}}{R_1 + h}; \\ \omega_{Yg} &= \Omega \sin \varphi + \frac{V_{Xg}}{R_1 + h} \operatorname{tg} \varphi; \\ \omega_{Zg} &= -\frac{V_{Zg}}{R_2 + h}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Чтобы гиropлатформа БПЛА следила за вращениями географического трехгранника, на ее двигатели необходимо подавать управляющие воздействия, пропорциональные угловым скоростям вращения географического трехгранника (8) или (11):

$$\left. \begin{aligned} M_y \approx \omega_{Yg} &= \Omega \sin \varphi + \frac{V_{Xg}}{R_1 + h} \operatorname{tg} \varphi = (\Omega + \dot{\lambda}) \sin \varphi; \\ M_z \approx \omega_{Zg} &= -\frac{V_{Zg}}{R_2 + h} = -\dot{\varphi}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Составляющие переносной угловой скорости  $\bar{\omega}^{\text{пер}}$  вырабатываются на основе показаний акселерометров.

Абсолютное ускорение  $\bar{a}$  есть производная от вектора абсолютной скорости  $\bar{V}$ , взятая относительно инерциального пространства

$$\bar{a} = \frac{d}{dt} \bar{V},$$

где  $d/dt$  – символ абсолютной производной.

По теореме о связи абсолютной производной от вектора с производной от того же вектора относительно подвижной системы координат имеем

$$\bar{a} = \frac{d}{dt} \bar{V} = \frac{\partial}{\partial t} \bar{V} + \bar{\omega}_a \times \bar{V},$$

где  $\frac{\partial}{\partial t}$  – символ производной относительно подвижной СК  $0_0X_0Y_0Z_0$ ;

$\bar{\omega}_a$  – абсолютная угловая скорость СК  $0_0X_0Y_0Z_0$  (платформы).

Проекции абсолютного линейного ускорения точки  $O_0$  на оси трехгранника  $O_0X_0Y_0Z_0$  определяются в виде зависимостей:

$$\begin{aligned} a_{X_g} &= \dot{V}_{X_g} + V_{Z_g} \omega_{X_g} - V_{Y_g} \omega_{Z_g}; \\ a_{Y_g} &= \dot{V}_{Y_g} + V_{X_g} \omega_{Z_g} - V_{Z_g} \omega_{X_g}; \\ a_{Z_g} &= \dot{V}_{Z_g} + V_{Y_g} \omega_{X_g} - V_{X_g} \omega_{Y_g}. \end{aligned} \quad (13)$$

Учитывая, что акселерометры измеряют разность абсолютного ускорения и ускорения свободного падения

$$\vec{a} = \vec{w} - \vec{g}$$

после подстановки зависимостей (9), (10) и (11) в (13), получаем выражения для составляющих кажущегося ускорения:

$$\begin{aligned} a_{X_g} &= \dot{V}_{X_g} + \frac{V_{Z_g}^2}{R} \operatorname{tg} \varphi + \frac{V_{X_g} V_{Y_g}}{R} + 2\Omega V_{Z_g} \sin \varphi; \\ a_{Y_g} &= \dot{V}_{Y_g} - \frac{V_{Z_g}^2}{R} - \frac{V_{X_g}^2}{R} - 2\Omega V_{Z_g} \cos \varphi + g; \\ a_{Z_g} &= \dot{V}_{Z_g} - \frac{V_{Z_g} V_{Y_g}}{R} - \frac{V_{X_g} V_{Z_g}}{R} \operatorname{tg} \varphi + 2(V_{Y_g} \Omega \cos \varphi - \Omega V_{X_g} \sin \varphi), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\dot{V}_{X_g} + \frac{V_{Z_g}^2}{R} \operatorname{tg} \varphi + \frac{V_{X_g} V_{Y_g}}{R}$ ,  $\dot{V}_{Y_g} - \frac{V_{Z_g}^2}{R} - \frac{V_{X_g}^2}{R}$ ,  $\dot{V}_{Z_g} - \frac{V_{Z_g} V_{Y_g}}{R} - \frac{V_{X_g} V_{Z_g}}{R} \operatorname{tg} \varphi$  –

проекции относительного ускорения на оси географической системы координат;

$2\Omega V_{Z_g} \sin \varphi$ ,  $2\Omega V_{Z_g} \cos \varphi + g$ ,  $2(V_{Y_g} \Omega \cos \varphi - \Omega V_{X_g} \sin \varphi)$  – проекции Кориолисова ускорения на  $OX_gY_gZ_g$ .

Инерциальные чувствительные элементы гироплатформы жестко установлены на борту летательного аппарата. В этом случае акселерометры измеряют проекции вектора кажущегося ускорения на ребра связанного с объектом трехгранника, и показания акселерометров необходимо перепроектировать в географическую систему координат в соответствии с информацией, выработанной в блоке ориентации.

При движении летательного аппарата по поверхности Земли необходимо, чтобы на входы первых интеграторов поступали только ускорения относитель-

ного движения  $\dot{V}_{Xg}$ ,  $\dot{V}_{Zg}$ . Следовательно, ускорения Кориолиса и ускорения, связанные с криволинейностью движения объекта вдоль сферической поверхности Земли, должны быть скомпенсированы. Из выражений (14) следует, что компенсирующие («вредные») составляющие ускорения равны:

$$\begin{aligned} a_{Xg}^k &= \frac{V_{Zg}^2}{R} \operatorname{tg} \varphi + \frac{V_{Xg} V_{Yg}}{R} + 2\Omega V_{Zg} \sin \varphi; \\ a_{Yg}^k &= \frac{V_{Zg}^2}{R} - \frac{V_{Xg}^2}{R} - 2\Omega V_{Zg} \cos \varphi + g; \\ a_{Zg}^k &= \frac{V_{Zg} V_{Yg}}{R} - \frac{V_{Xg} V_{Zg}}{R} \operatorname{tg} \varphi + 2(V_{Yg} \Omega \cos \varphi - \Omega V_{Xg} \sin \varphi). \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, на входы первых интеграторов необходимо подавать следующие величины:

$$\begin{aligned} a_{Xg} - a_{Xg}^k &= \dot{V}_{Xg}; \\ a_{Zg} - a_{Zg}^k &= \dot{V}_{Zg}; \\ a_{Yg} - a_{Yg}^k &= \dot{V}_{Yg}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $a_{Xg}$ ,  $a_{Zg}$ ,  $a_{Yg}$  – проекции вектора кажущегося ускорения на оси географической системы координат.

Составляющие относительной скорости движения объекта образуются после интегрирования ускорений (16) с учетом ввода начальных скоростей  $V_{Xg}(t_0)$  и  $V_{Zg}(t_0)$ :

$$\begin{aligned} V_{Xg} &= V_{Xg}(t_0) + \int_{t_0}^t (a_{Xg} - a_{Xg}^k) dt = V_{Xg}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_{Xg} dt, \\ V_{Zg} &= V_{Zg}(t_0) + \int_{t_0}^t (a_{Zg} - a_{Zg}^k) dt = V_{Zg}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_{Zg} dt; \\ V_{Yg} &= V_{Yg}(t_0) + \int_{t_0}^t (a_{Yg} - a_{Yg}^k) dt = V_{Yg}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_{Yg} dt. \end{aligned} \quad (17)$$

В дальнейшем, для определения абсолютной угловой скорости географического трехгранника ( $\omega_{Xg}$ ,  $\omega_{Yg}$ ,  $\omega_{Zg}$ ), а так же для нахождения вредных состав-

ляющих ускорения (формула 15) нам понадобится координата широты  $\varphi$ , которая определяется с помощью вторичного интегрирования (с учетом начальных значений координат):

$$\psi = \psi(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_{Xg}}{R_2 + h} dt. \quad (18)$$

Если составляющие переносной угловой скорости скомпенсированы (12), то проекции угловой скорости трёхгранника OXYZ относительно географической системы координат  $OX_g Y_g Z_g$  имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{X_g}^{oTH} &= \dot{\gamma} + \dot{\psi} \sin \vartheta; \\ \omega_{Y_g}^{oTH} &= \dot{\vartheta} \sin \gamma + \dot{\psi} \cos \gamma \cos \vartheta; \\ \omega_{Z_g}^{oTH} &= -\dot{\psi} \sin \gamma \cos \vartheta + \dot{\vartheta} \cos \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Разрешая уравнения (19) относительно  $\dot{\psi}, \dot{\vartheta}, \dot{\gamma}$ , можно получить известную систему кинематических уравнений в углах Эйлера-Крылова:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi} &= \frac{1}{\cos \vartheta} [\omega_{Y_g}^{oTH} \cos \gamma - \omega_{Z_g}^{oTH} \sin \gamma]; \\ \dot{\vartheta} &= \omega_{Y_g}^{oTH} \sin \gamma + \omega_{Z_g}^{oTH} \cos \gamma; \\ \dot{\gamma} &= \omega_{X_g}^{oTH} - \operatorname{tg} \vartheta [\omega_{Y_g}^{oTH} \cos \gamma - \omega_{Z_g}^{oTH} \sin \gamma]. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Недостаток уравнений (20) – их некорректность при  $\vartheta = \pm 90^\circ$ . Следовательно, использовать их можно только в ограниченном диапазоне углов  $\vartheta$  или же необходимо исключать некорректную ситуацию дополнительными алгоритмами (уравнения Пуассона или уравнения с параметрами Родрига-Гамильтона).

Выражения (15)–(20) составляют алгоритм работы гиросплатформы БПЛА, который определяет работу вычислительного устройства. Реализация этого алгоритма показана в виде структурной схемы (рис. 5).

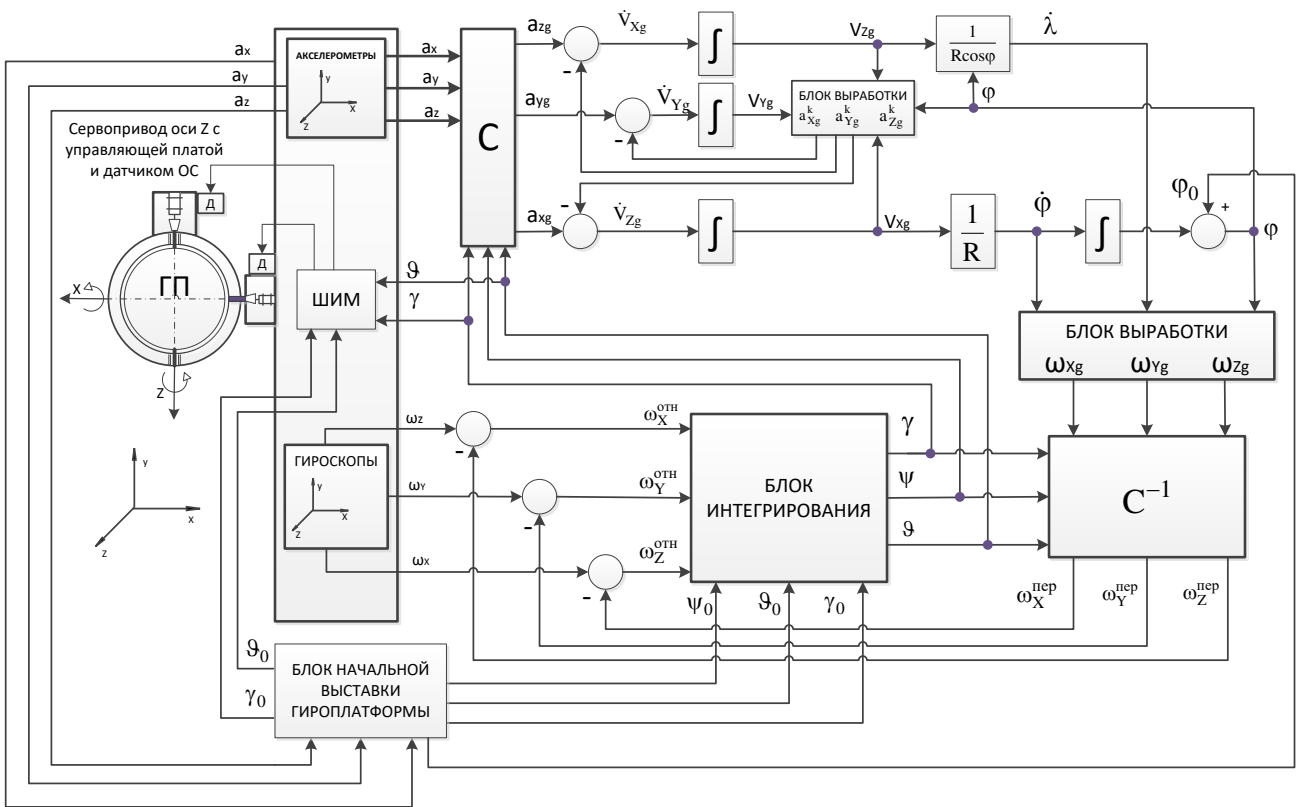


Рис. 5. Структурная схема гиросtabilизированной платформы

Работа гиросtabilизированной платформы происходит следующим образом. Блок акселерометров вырабатывает проекции вектора кажущегося ускорения  $a_x, a_y, a_z$  на ребра связанного трёхгранника. Пересчет компонент вектора кажущегося ускорения из связанного трехгранника в географический осуществляется с помощью матрицы  $C$  (выражение 3), которая вычисляется на основе показаний датчика угловых скоростей.

Таким образом, моделируется плоскость горизонта, на которую проецируются вектора кажущегося ускорения. В результате пересчета образуются проекции кажущегося ускорения  $a_{Xg}, a_{Yg}, a_{Zg}$  на оси географической системы координат. Из составляющих  $a_{Xg}, a_{Yg}, a_{Zg}$  исключаются компенсирующие ускорения  $a_{Xg}^k, a_{Yg}^k, a_{Zg}^k$ , сформированные на основании равенства (15), в результате чего образуются ускорения относительного движения БПЛА  $\dot{V}_{Xg}, \dot{V}_{Yg}, \dot{V}_{Zg}$  по формуле (16). Двукратное интегрирование  $\dot{V}_{Xg}$ , на основе уравнений (17) и (18) позволяет определить координату широты и скорости летательного аппарата. По информации об угловых скоростях  $\dot{\varphi}$  и  $\dot{\lambda}$ , широте  $\varphi$  и угловой

скорости Земли  $\Omega$  вырабатываются проекции абсолютной угловой скорости географического трёхгранника на свои оси  $\omega_{Xg}$ ,  $\omega_{Yg}$ ,  $\omega_{Zg}$  на основе соотношений (11). Составляющие переносной угловой скорости  $\omega_{X}^{пер}$ ,  $\omega_{Y}^{пер}$ ,  $\omega_{Z}^{пер}$  получаем после пересчёта с помощью матрицы  $C^{-1}$ .

Выработка параметров ориентации углов рыскания  $\psi$ , тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$  происходит на основе измерений ДУС. Три ДУС измеряют проекции вектора абсолютной угловой скорости летательного аппарата  $\omega_X$ ,  $\omega_Y$ ,  $\omega_Z$  на рёбра связанного трёхгранника. Из показаний ДУС вычитаются проекции вектора угловой скорости географического трёхгранника на оси связанной системы координат  $\omega_{X}^{пер}$ ,  $\omega_{Y}^{пер}$ ,  $\omega_{Z}^{пер}$ , которые для БПЛА являются переносной угловой скоростью, вследствие чего образуются относительные угловые скорости  $\omega_{X}^{отн}$ ,  $\omega_{Y}^{отн}$ ,  $\omega_{Z}^{отн}$ . По информации о проекциях  $\omega_{X}^{отн}$ ,  $\omega_{Y}^{отн}$ ,  $\omega_{Z}^{отн}$  вырабатываются углы рыскания  $\psi$ , тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$  интегрированием уравнений (20). На основании значений углов  $\psi$ ,  $\vartheta$ ,  $\gamma$  формируются матрицы  $C$  и  $C^{-1} = C^T$ . Так же значения  $\psi$  и  $\vartheta$  являются управляющими сигналами для управления двигателями гироскопов, эти сигналы обрабатываются в ШИМ и подаются как управляющий сигнал в виде импульсов на плату управления сервопривода.

## 2 НАЧАЛЬНАЯ ВЫСТАВКА ГИРОПЛАТФОРМЫ

Для запуска алгоритмов работы гироскопов необходимо ввести начальное значение широты местоположения БПЛА и параметры ориентации – угловое положение БПЛА, на котором жестко закреплены датчики акселерометров и гироскопов, по отношению к географической системе координат. Начальная выставка может быть автономной и с привлечением информации от других навигационных систем (магнитометров, систем спутниковой навигации и других).

Рассмотрим автономный способ начальной выставки гироскопов на неподвижном относительно Земли БПЛА. В данном случае входной измерительной информацией являются ускорение силы тяжести для акселерометров и уг-

ловая скорость суточного вращения Земли для ДУС. В начальный момент времени БПЛА занимает произвольное положение относительно географического трёхгранника  $OX_g Y_g Z_g$ , определяемое углами  $\psi_0, \vartheta_0, \gamma_0$ , которые являются искомыми для решения задачи начальной выставки.

Пользуясь показаниями акселерометра, не трудно найти начальные углы тангажа и крена

$$\begin{aligned}\vartheta_0 &= \arcsin \frac{g_X}{g}; \\ \gamma_0 &= \arctg \left( -\frac{g_Z}{g_Y} \right).\end{aligned}\tag{21}$$

Из сигналов акселерометра невозможно найти ориентацию летательного аппарата в азимуте (по углу  $\psi_0$ ). Для определения начального угла рыскания используем сигналы ДУС. Начальное значение угла рыскания может быть получено по сигналу одного продольного ДУС и найденному по выражению (21) углу  $\vartheta_0$ :

$$\omega_X = \Omega_\Gamma \cos \vartheta_0 \cos \psi_0 + \Omega_B \sin \vartheta_0,\tag{22}$$

откуда

$$\begin{aligned}\Omega_\Gamma \cos \vartheta_0 \cos \psi_0 &= \omega_X - \Omega_B \sin \vartheta_0; \\ \cos \psi_0 &= \frac{\omega_X - \Omega_B \sin \vartheta_0}{\Omega_\Gamma \cos \vartheta_0}; \\ \psi_0 &= \arccos \frac{\omega_X - \Omega_B \sin \vartheta_0}{\Omega_\Gamma \cos \vartheta_0};\end{aligned}\tag{23}$$

Так как  $\Omega_B = \Omega \sin \varphi$  и  $\Omega_\Gamma = \Omega \cos \varphi$ , то, подставив данные равенства в выражение (23), получим выражения для определения начального значения угла рыскания и определим ориентацию летательного аппарата в азимуте

$$\psi_0 = \arccos \frac{\omega_X - \Omega \sin \vartheta_0 \sin \varphi}{\Omega \cos \varphi \cos \vartheta_0}.\tag{24}$$

После определения начальных значений углов  $\psi_0, \vartheta_0, \gamma_0$  можно рассчитать начальную матрицу перехода  $C_0$ .

Информация об углах крена и тангажа ( $\gamma, \vartheta$ ), найденная по показаниям акселерометров на земле в покое, поступает через ШИМ на управляющую плату серводвигателей. Серводвигатели изначально при сборке гироскопа выставлены по горизонтальным осям. Когда на плату контроля привода поступает управляющий сигнал, моторы включатся и начнут вращать платформу. С выходного вала сервопривода снимается сигнал, который является сигналом обратной связи, двигатели будут работать до тех пор, пока сигнал с датчика обратной связи не уравнивается с управляющим сигналом, как только рассогласование прекратится, управляющая плата сервопривода отключит двигатели, гироскоп находится в горизонтальном положении по всем осям.

Реализация полученного алгоритма управления сервоприводами гироскопа была осуществлена с использованием программируемой аппаратной платформы Arduino версии UNO. Электрическая схема гироскопа приведена на *рис. 6*.

Из электрической схемы видно, что роль вычислителя выполняет микроконтроллер ATmega328, трёхосевые МЭМС (микроэлектромеханические системы) датчики гироскопа и акселерометра выполнены на микросхеме MPU 6050. Микросхема MPU-6050, в свою очередь, установлена на модуле GY-521, который включает в себя всю электрическую обвязку, стабилизатор напряжения, необходимые для работы микросхемы. В качестве сервоприводов использовались шаговые двигатели фирмы TowerPro – SG90MicroServo. Разработка программ велась с использованием среды Arduino IDE.



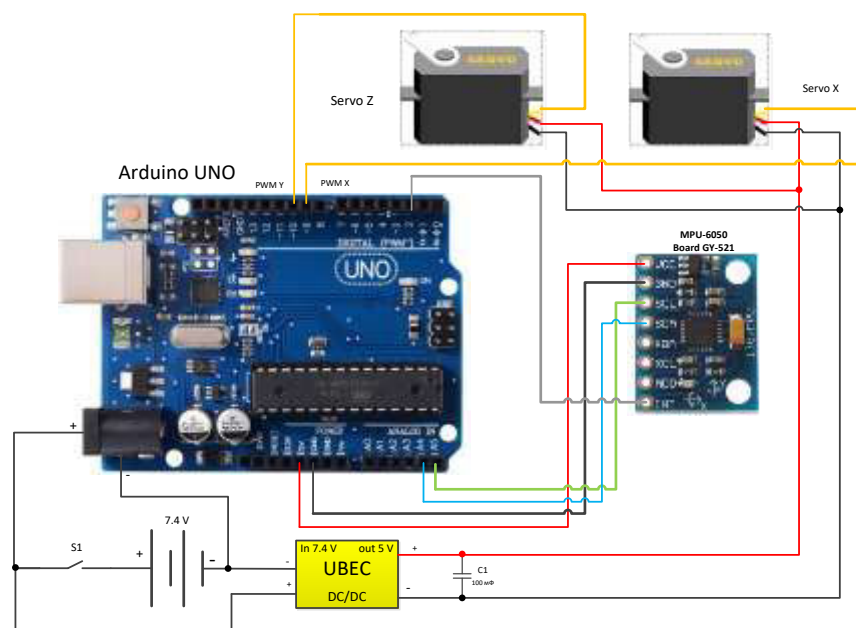


Рис. 6. Электрическая схема гиросtabilизированной платформы

Разработанное программное обеспечение с сервоприводами позволяет эффективно стабилизировать платформу площадью  $S=50 \text{ см}^2$  макета БПЛА с нагрузкой массой 300 г при заданных угловых скоростях крена и тангажа до  $180 \text{ }^\circ/\text{с}$  в диапазоне углов крена и тангажа  $\pm 85^\circ$ . Погрешность стабилизации не превышает  $0,5^\circ$ .

### Библиографический список

1. *Зинченко О. Н.* Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофото­съемки для картографирования (Ч. 1). ЗАО «Ракурс» // [Электронный ресурс]. – 2011. URL: // [http://www.racurs.ru/www\\_download/articles/UAV\\_1.pdf](http://www.racurs.ru/www_download/articles/UAV_1.pdf) (дата обращения: 10.02.2017).
2. *Матвеев В. В.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, Р. Я. Распопов. М.: Электроприбор, 2009. 276 с.

### References

1. *Zinchenko, O. N.* Unmanned aerial vehicles: application in aerial photography for mapping (part 1). – ZAO «RAKURS», 2011 // [Electronic resource]. – URL: [http://www.racurs.ru/www\\_download/articles/UAV\\_1.pdf](http://www.racurs.ru/www_download/articles/UAV_1.pdf) [accessed 10 February 2017] (in Russian)
2. *Matveev V. V., Raspopov R. I.* Basic Principles of Strapdown Inertial Navigation Systems. – M: Elektropribor, 2009. 276 p. (in Russian)