

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.

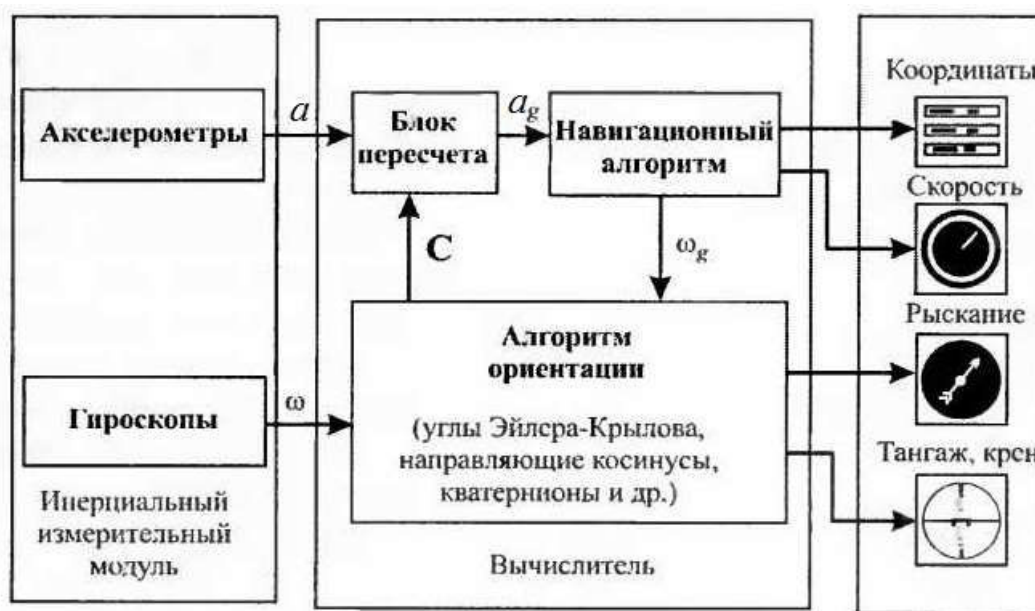


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема БИНС

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

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

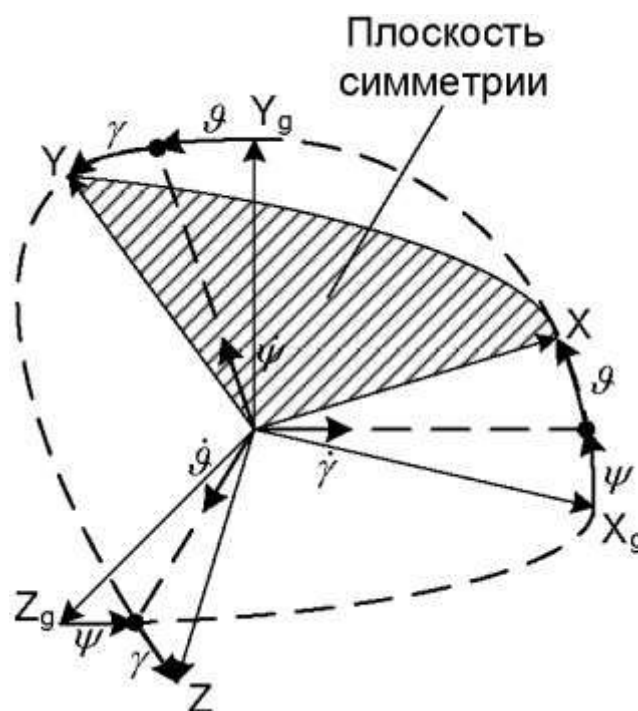


Рис. 2. Взаимное расположение связанной и географической системы координат

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:

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

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

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

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

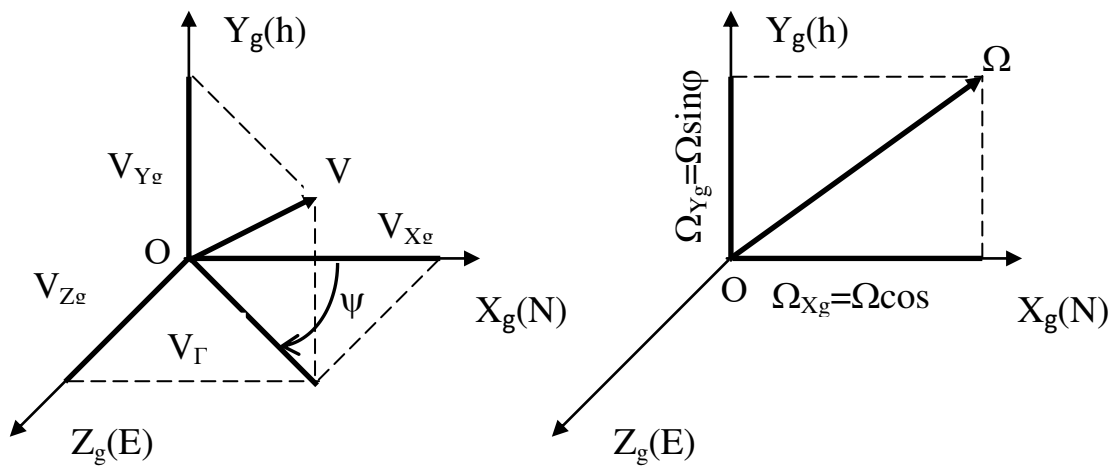


Рис. 3. Проекция векторов линейной скорости объекта (а) и угловой скорости Земли (б) на ребра географического трехгранника

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 сфероид – радиус окружности экватора ( $a = 6\,378\,245$  м);

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

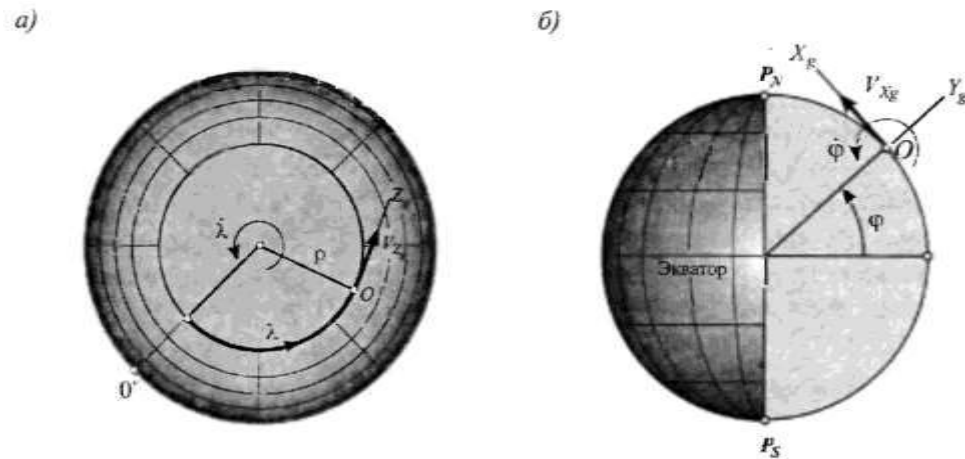


Рис. 4. Угловые скорости: (а)  $\dot{\lambda}$ ; (б)  $\dot{\varphi}$

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<sub>g</sub>Y<sub>g</sub>Z<sub>g</sub> 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).

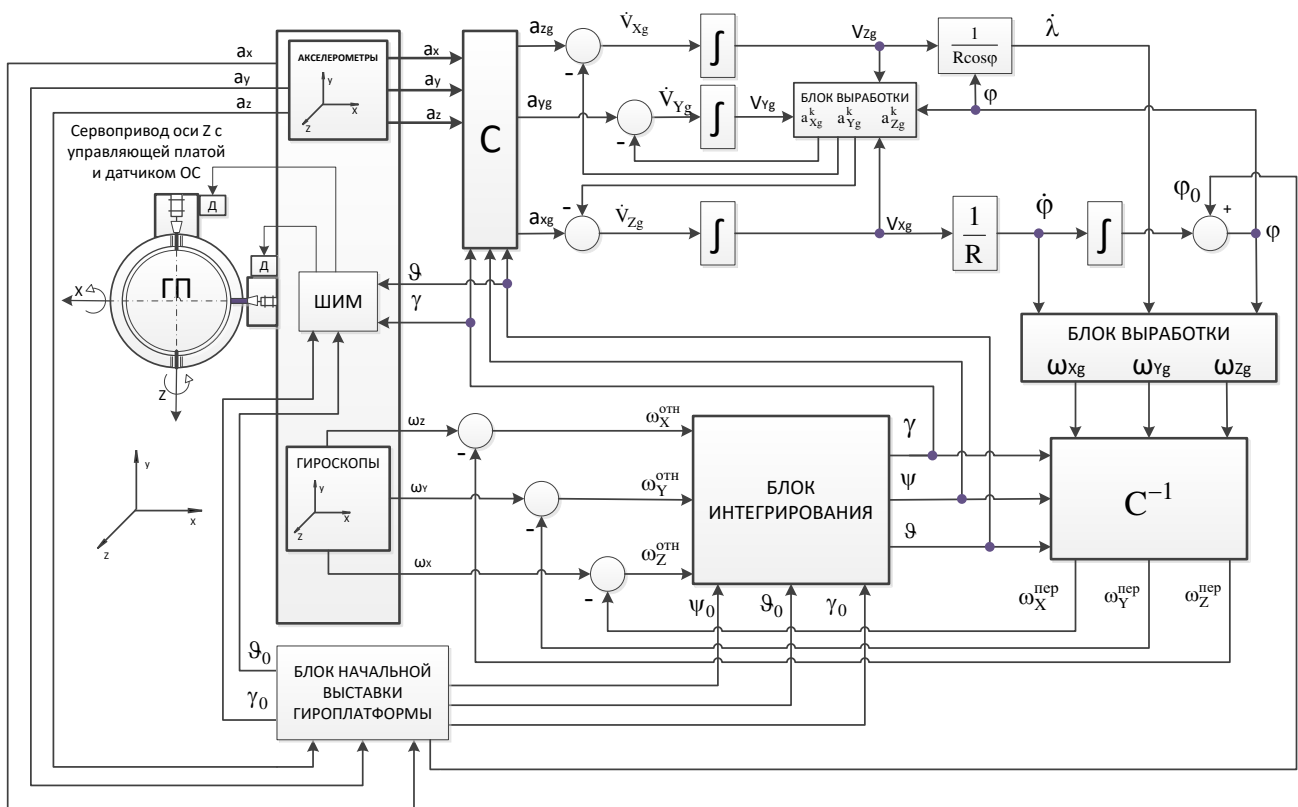


Рис. 5. Структурная схема гиросtabilизированной платформы

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 трёхгранника 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  $\dot{\phi}$  и  $\dot{\lambda}$ , широте  $\phi$  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.



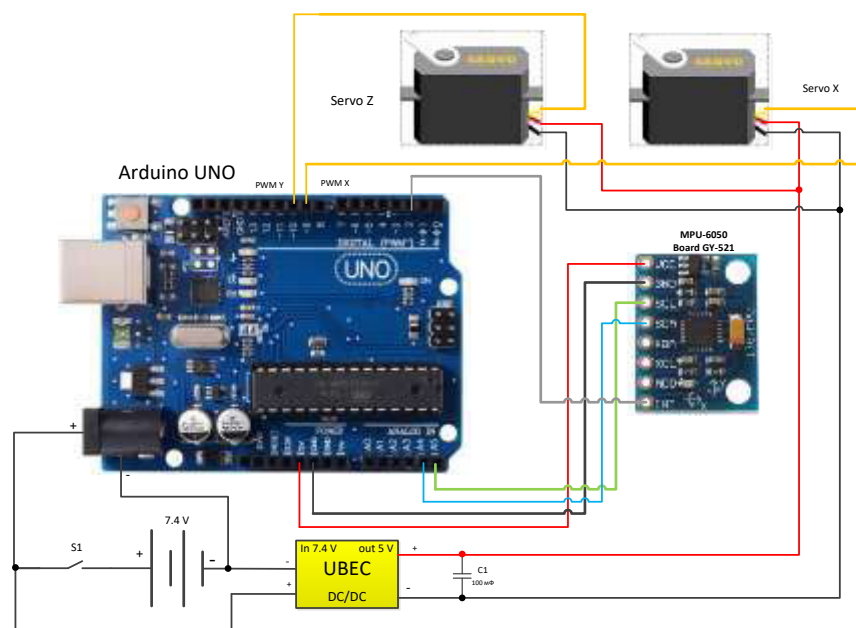


Рис. 6. Электрическая схема гиросtabilизированной платформы

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)