

Полунатурное моделирование беспилотных летательных аппаратов типа мультикоптер

Гоголев А.А.

*Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, ГОСНИИАС, ул. Викторенко, 7, Москва, 125167, Россия,
e-mail: kirbizz8@yandex.ru*

Аннотация

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) типа мультикоптер благодаря простоте своей конструкции активно используются в любительском авиамоделировании, гражданских и военных областях. Снизить риски, сократить время и повысить эффективность разработки мультикоптеров призван метод полунатурного моделирования (ПНМ), широко применяемый для отработки бортовых систем летательных аппаратов. Метод ПНМ призван заменить часть механизмов математической моделью, сохранив при этом максимальную адекватность натурному образцу. В данной статье представлена структура комплекса ПНМ, позволяющего осуществлять отработку систем управления БЛА (в том числе критических режимов), систем управления гиростабилизированным подвесом, отработку измерительных систем и идентификацию характеристик математических моделей [1].

Ключевые слова: полунатурное моделирование; комплекс полунатурного моделирования; беспилотный летательный аппарат; мультикоптер; квадрокоптер.

Введение

Первые беспилотные летательные аппараты (БЛА) типа мультикоптер появились на заре вертолетостроения, однако всеобщую популярность получили лишь в XXI веке [2]. Быстрое развитие мультикоптеры получили вследствие внедрения МЭМС технологий, бесколлекторных моторов, а также появления ёмких литий-полимерных аккумуляторов обладающих малым весом. Простота конструкции позволяет их использовать как в гражданском авиамоделировании, так и в военном применении. Несмотря на свою простоту, мультикоптеры имеют существенный недостаток: в отличие от самолета и вертолета мультикоптер не имеет механизма планирования и авторотации, поэтому при полном, а так же во многих случаях частичном отключении моторов переходит в неуправляемое падение и, как следствие, происходит разрушение конструкции самого мультикоптера с дорогостоящим оборудованием.

Метод ПНМ позволяет использовать все достоинства математического моделирования, добавив при этом в контур моделирования реальные бортовые системы, имитаторы радиоэлектронного оборудования и специализированные средства моделирования, осуществляющие подыгрыш внешних физических воздействий. Как правило, при применении метода ПНМ идет процесс постепенного замещения математических моделей

отдельными реальными образцами аппаратуры, в первую очередь, с большими потоками информации (обычно начиная с реальных БЦВМ). Поэтому центральный вычислитель БЛА, осуществляющий обработку больших потоков информации, используется реальный, а аппаратура со слабым информационным взаимодействием (например GPS, барометр, компас) заменяется имитаторами навигационных датчиков.

Схема комплекса ПНМ БЛА типа мультикоптер представлена на рисунке 1. Комплекс ПНМ БЛА состоит из вычислительного центра и средств моделирования.

Вычислительный центр осуществляет:

- Расчет математической модели для подготовки навигационных параметров для шестистепенной платформы;
- Подыгрыш внешней обстановки (атмосферы);
- Визуализацию результатов математического моделирования;
- Регистрацию навигационных параметров средств моделирования и внутренних параметров математической модели.

Средства моделирования выполняют следующие функции:

- Обеспечение динамического подобия с помощью шестистепенной платформы Гью-Стьюарта;
- Имитацию навигационных датчиков (GPS, барометр, компас);
- Визуализацию внешней обстановки с использованием коллиматора для отработки оптических систем;

- Обеспечение управления БЛА типа мультикоптер с помощью центрального вычислителя БЛА.

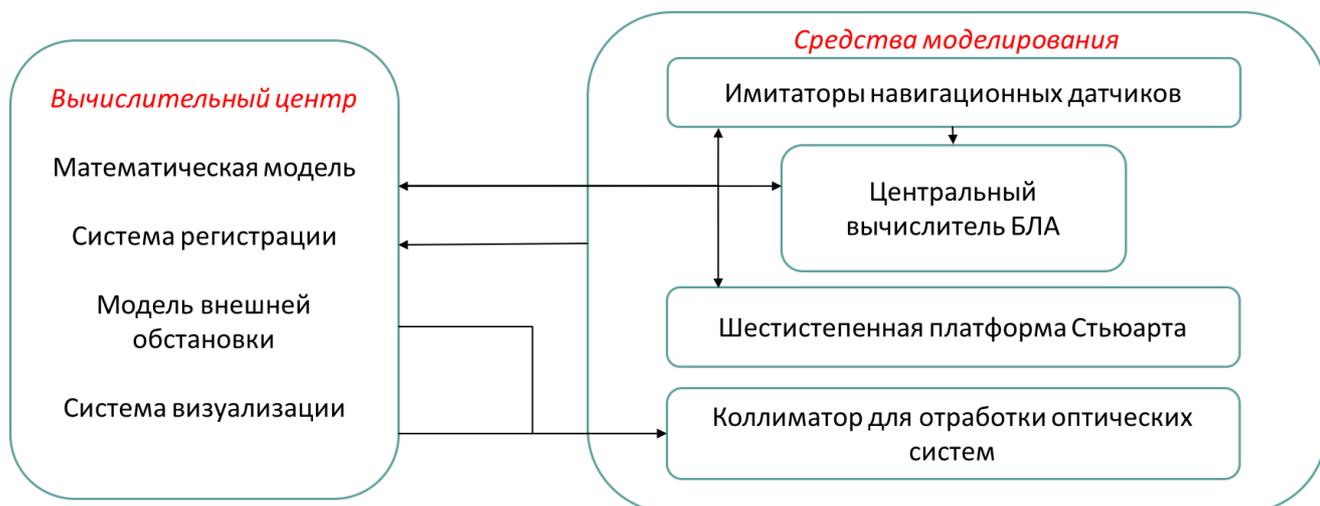


Рисунок 1 – Схема комплекса ПНМ БЛА типа мультикоптер.

Математическая модель БЛА типа мультикоптер

Моделирование, а также дальнейшие уравнения для упрощения будем приводить для модели квадрокоптера (4-х винтовой схемы), как самого простого, но в тоже время достаточно адекватного ЛА для моделирования многороторных БПЛА. Обозначим связанную с БПЛА систему координат $\{B\}$ в центре пересечения балок рамы с осями жестко связанными с балками XYZ (Рисунок 2). Систему координат связанную с Землей обозначим как $\{E\}$ с центром в центре Земли и соответствующими осями $X_1 Y_1 Z_1$ (Рисунок 3) [3].

Квадрокоптер в пространстве имеет шесть степеней свободы. Его движение состоит из поступательного движения центра масс и сферического движения тела относительно центра масс [4]. Главные эффекты, оказывающие воздействие на квадрокоптер:

- Подъемная сила;
- Сила тяжести;
- Гироскопический эффект БПЛА;
- Гироскопический эффект винта;
- Моменты инерции силовой установки.

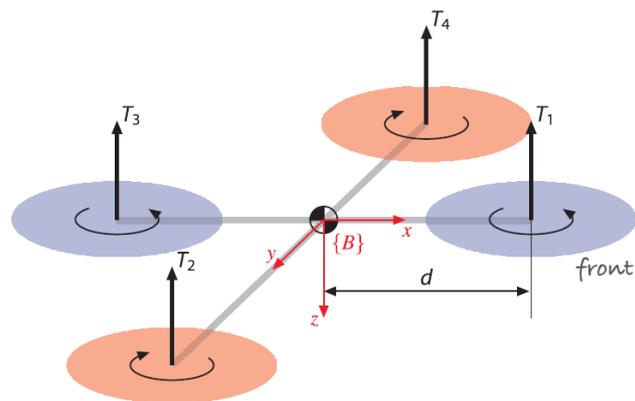


Рисунок 2 – Схема многороторного БПЛА с указанием связанной системы координат.

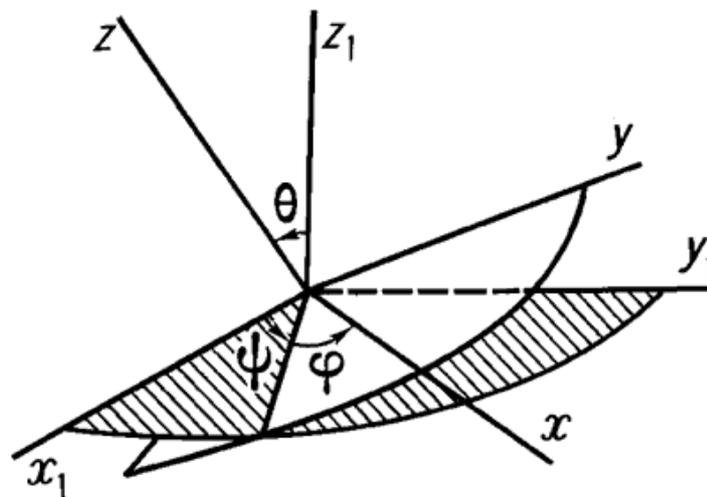


Рисунок 3 – Земная и связанные системы координат.

Квадрокоптер (Рисунок 2) имеет 4 двигателя, расположенные на концах соответствующих осей рамы и пронумерованных от 1 до 4. Двигатели приводятся в движение с помощью специального контроллера, создавая при этом подъемную силу, действующую в связанной системе координат [4]:

$$T = \sum T_i, \quad (1)$$

T_i – подъемная сила, создаваемая каждым двигателем;

T – суммарная подъемная сила.

Каждый винт в паре с двигателем создает подъемную силу [3]:

$$T_i = b\omega_i^2, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3, 4;$$

ω_i – скорость вращения двигателя;

$b > 0$ – константа, зависящая от сопротивления воздуха, числа винтов, длины хорды винта.

Модель движения центра масс в Земной системе координат в соответствии со 2-м законом Ньютона (с учетом подъемной силы и силы тяги двигателя):

$$m\dot{V} = m \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} - \Theta \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{pmatrix}, \quad (3)$$

g – гравитационная постоянная;

T – подъемная сила;

Θ – матрица перехода из связанной системы координат в Земную.

Движение вокруг центра масс осуществляется в соответствии с формулой Эйлера:

$$J\dot{\omega} = -\omega \times J\omega + \Gamma, \quad (4)$$

J – матрица коэффициентов инерции ЛА (3x3);

ω – вектор угловой скорости;

Γ – момент внешних сил.

Момент создаваемый по оси X связанной системы координат можно записать следующим образом [3]:

$$\tau_x = d(T_4 - T_2), \quad (5)$$

d – расстояние от моторов до центра масс;

T – подъемная сила двигателя.

Аналогично можно записать момент действующий по оси Y связанной системы координат [3]:

$$\tau_y = d(T_1 - T_3), \quad (6)$$

d – расстояние от моторов до центра масс;

T – подъемная сила двигателя.

Вращающий момент вокруг оси запишется следующим образом [3]:

$$\tau_z = k(\omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2), \quad (7)$$

ω_i – скорость вращения двигателя;

k - константа, зависящая от сопротивления воздуха, числа винтов, длины хорды винта.

Подъемную силу и моменты описанные выше можно представить в следующей векторно-матричной форме [3]:

$$\begin{pmatrix} T \\ \Gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b & -b & -b & -b \\ 0 & -db & 0 & db \\ db & 0 & -db & 0 \\ k & -k & k & -k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

b, k, d – константы;

T – подъемная сила;

Γ – вращающий момент: $\Gamma = (\tau_x, \tau_y, \tau_z)^T$;

ω_i – скорость вращения двигателя.

Так как матрица A положительно определена, то можно произвести ее обращение, в результате чего получим следующее выражение:

$$\begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} T \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Гироскопический момент БПЛА возникает вследствие того, что существует вращение винтов, что порождает вращение БПЛА в целом. Соотношения, которые выражают данный эффект представлены ниже (10) [4].

$$\begin{aligned}
 \tau_{x_{gyro}} &= \dot{\theta}\dot{\psi}(J_y - J_z); \\
 \tau_{y_{gyro}} &= \dot{\phi}\dot{\psi}(J_z - J_x); \\
 \tau_{z_{gyro}} &= \dot{\theta}\dot{\phi}(J_x - J_y),
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

$\dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\phi}$ - соответствующие угловые скорости;

J_x, J_y, J_z - моменты инерции относительно соответствующих осей.

Гироскопический эффект винта возникает в следствие того, что винт, как любое твердое тело обладает массой и соответствующим моментом инерции, который порождает возникновение гироскопического момента [4].

$$\begin{aligned}
 \tau_{x_{rotor}} &= \dot{\theta}J_r\omega_r; \\
 \tau_{y_{rotor}} &= \dot{\phi}J_r\omega_r; \\
 \tau_{z_{rotor}} &= J_r\dot{\omega}_r,
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

J_r - момент инерции винта;

ω_r - скорость вращения винта.

В приведенных выше формулах присутствует моментно-массовая характеристика – момент инерции, которую на данном этапе

экспериментальных расчетов возможно вычислить в соответствии с формулами [3]:

$$J_x = J_y = \frac{mr^2}{2} + \frac{mh^2}{6} + 2ml^2 + \frac{m_h r_h^2}{4} + \frac{m_h r_h^2}{12}, \quad (12)$$

$$J_z = \frac{m_h r_h^2}{2} + 4ml^2, \quad (13)$$

m – масса летательного аппарата;

r – длина луча рамы;

h – высота рамы;

m_h – масса центральной пластины летательного аппарата;

r_h – радиус центральной пластины.

Матрицы для перехода между связанной системой координат и Земной:

$$R_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Система регистрации используется для фиксации результатов и хода экспериментов проводимых на стенде ПНМ БЛА. В качестве регистрируемых параметров используются:

- Параметры математической модели;
- Навигационные параметры имитаторов навигационных датчиков;
- Навигационные данные и данные сигналов управления центрального вычислителя БЛА;
- Навигационные данные с шестистепенной платформы Гью-Стьюарта;
- Навигационные параметры коллиматора отработки оптических систем.

Модель внешней обстановки

Модель внешней обстановки реализована с помощью встроенного блока среды Matlab Simulink. Модель внешней обстановки содержит следующие внешние воздействия:

- Гравитационная модель WGS-84;
- Модель атмосферы COESA;
- Дискретную модель ветра в 3-х осях.

Система визуализации

В качестве системы визуализации системы математического моделирования выбрана наиболее удобная система – авиасимулятор FlightGear. В данную систему добавлена 3D модель БЛА типа мультикоптер. Результат работы системы визуализации представлен на рисунке 4.

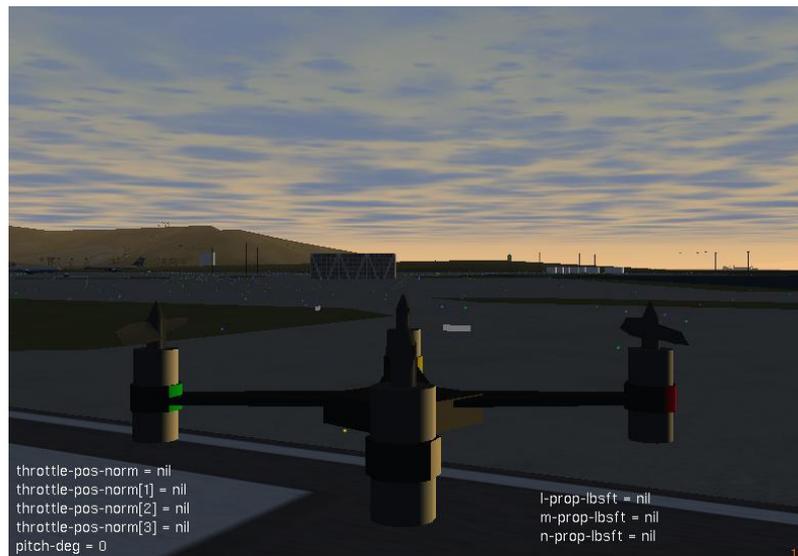


Рисунок 4 – Система визуализации.

Шестистепенная платформа Гью-Стьюарта

Обработка внутренних чувствительных датчиков центрального вычислителя БЛА осуществляется посредством изменения линейного и углового положения контроллера в пространстве. В комплексе ПНМ БЛА данная задача решается с помощью использования шестистепенной платформы Гью-Стьюарта [6].

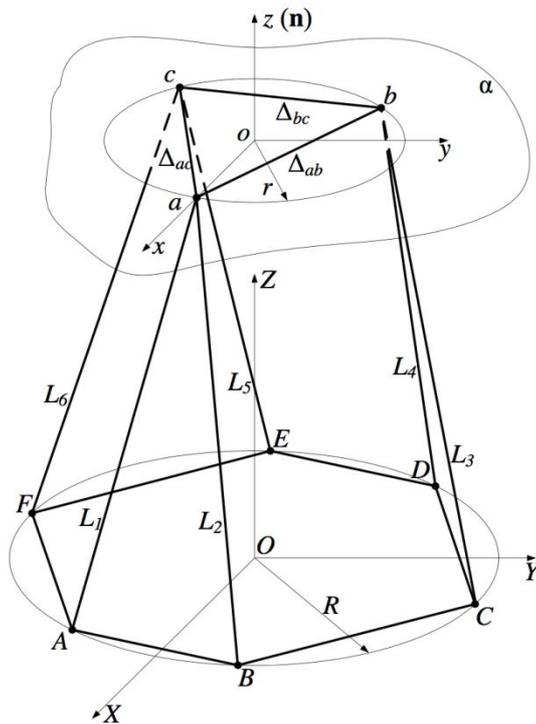


Рисунок 5 – Схема платформы Гью-Стьюарта.

Шестистепенная платформа Гью-Стьюарта – разновидность манипулятора, имеющая шесть степеней свободы с октаэдральной компоновкой стоек (Рисунок 5) [7]. Платформа состоит из двух частей (платформ), соединенных между собой телескопическими штангами. Полагаем, что платформы представляют собой идеальные диски радиусами R и r для основания и подвижной платформы соответственно. Штанги крепятся к платформам с помощью сферических шарниров. Шарниры подвижной платформы лежат в плоскости подвижной платформы в вершинах правильного треугольника с радиусом r . Неподвижная система координат связана с основанием и ее начало от- счета лежит в центре правильного шестигранника ABCDEF (Рисунок 5). Подвижная система координат связана

с подвижной платформой, и ее начало отсчета лежит в центре правильного треугольника abc (Рисунок 5)[7].

Схема программно-аппаратного комплекса шестистепенной платформы Гью-Стьюарта представлена на рисунке 6. Программно-аппаратный комплекс состоит из контроллера управления Arduino Mega 2560, шести сервомашин (SERVO), жидкокристаллического монитора (LCD), джойстика для управления режимами работы (JOYSTICK), сетевого адаптера связи с вычислительным центром по сети Ethernet (LAN).

Центральный вычислитель БЛА

Центральный вычислитель БЛА - основная плата управления, обеспечивающая функционирование мультикоптера (Рисунок 7). В качестве центрального вычислителя используется микроконтроллер, осуществляющий следующие функции:

- Подключение навигационных датчиков;
- Стабилизация углового положения мультикоптера;
- Стабилизация высоты и линейного положения мультикоптера;
- Выдача сигналов управления контроллерам бесколлекторных двигателей;
- Обработка сигналов управления;
- Подключение дополнительных периферийных устройств.

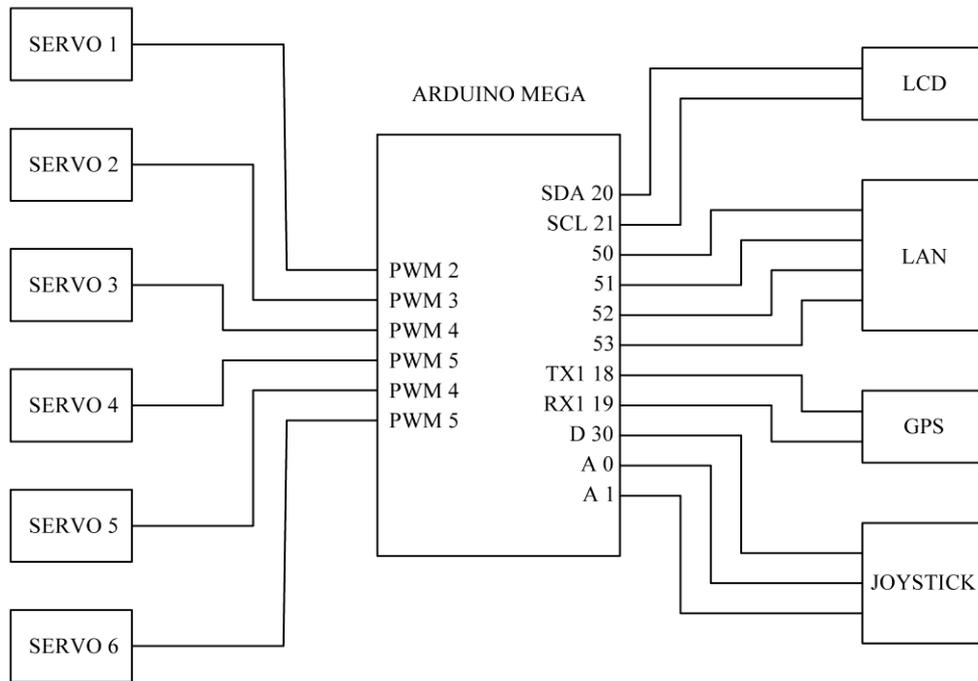


Рисунок 6. Программно-аппаратный комплекс шестистепенной платформы Гью-Стьюарта.



Рисунок 7 – Центральный вычислитель БЛА.

Стабилизация углового положения мультикоптера в пространстве осуществляется за счет использования бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), состоящей из 3-х осевого акселерометра и 3-х гироскопов, размещенных на центральном вычислителе [8].

Стабилизация угла курса осуществляется на основе использования внешнего 3-х осевого магнитного компаса. Удержание высоты осуществляется за счет использования барометра. Стабилизация линейного положения осуществляется за счет использования спутникового приемника GPS/GLONASS.

Центральный вычислитель БЛА размещается на шестистепенной платформе Гью-Стьюарта.

Имитаторы навигационных датчиков

Имитаторы навигационных датчиков предназначены для обеспечения информационного взаимодействия спутникового приемника (GPS/GLONASS), барометра и компаса. Имитатор исключает из работы чувствительный элемент, осуществляющий преобразование навигационного параметра в некоторый электрический сигнал, позволяя передавать параметры математической модели в центральный вычислитель БЛА. Схема подключения имитаторов навигационных датчиков к центральному вычислителю представлена на рисунке 8.

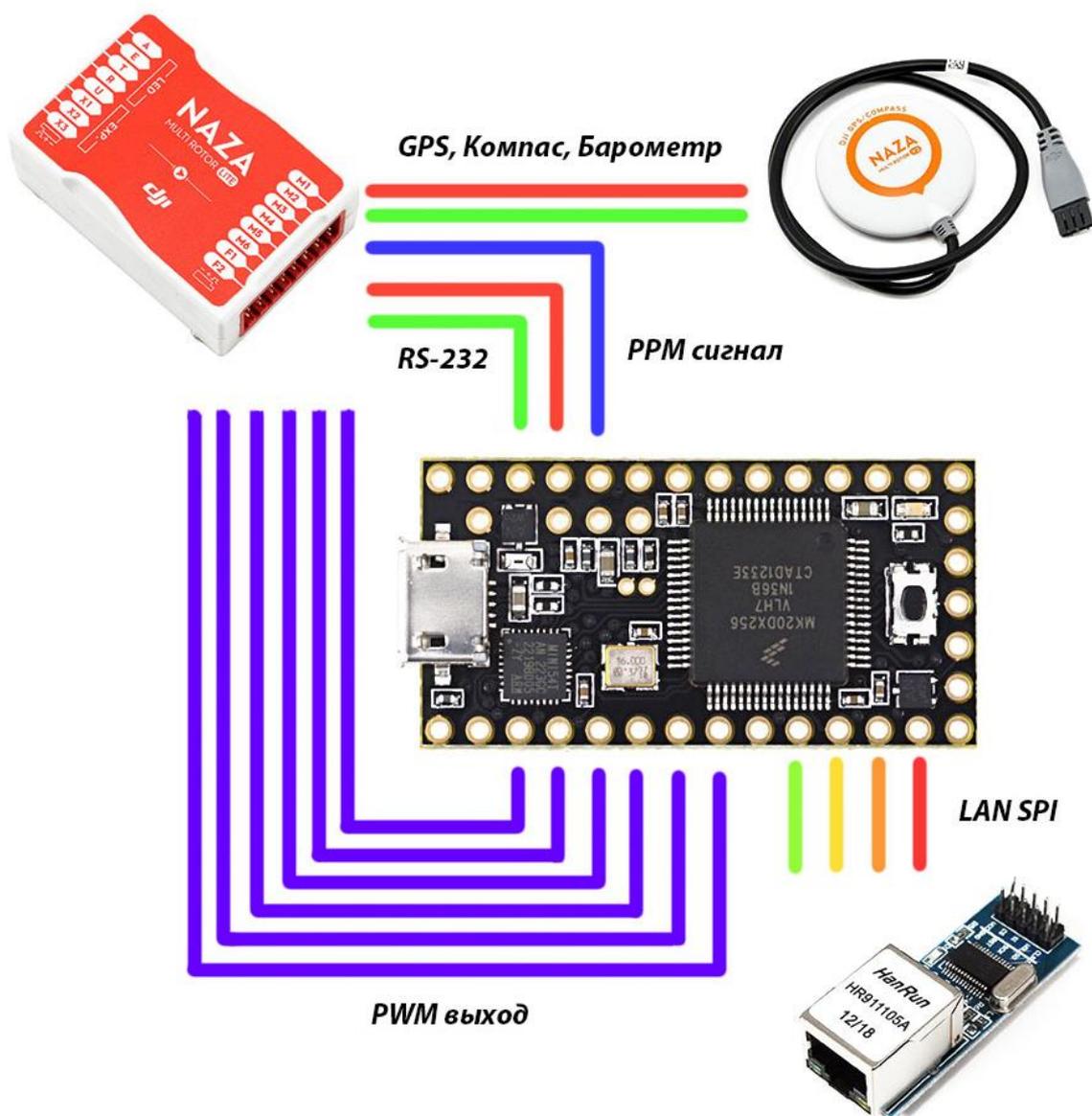


Рисунок 8 – Подключение имитаторов навигационных датчиков к центральному вычислителю БЛА.

Коллиматор для обработки оптических систем

Система визуализации закабинной обстановки предназначена для создания реалистичной картины внекабинной обстановки и смены её в зависимости от манёвров самолёта. Трёхмерное пространство закабинной обстановки состоит из множества простейших геометрических фигур

которые требуют задания пространственных координат, ориентации и цвета. Вывод полученного изображения осуществляется с помощью применения коллиматора, позволяющего производить проецирование изображения проектора на бесконечность. Изображение с монитора попадает на наклонное полупрозрачное зеркало и отражается в сторону вогнутого сферического зеркала, а дальше лучи движутся параллельным пучком, создавая иллюзию, что объект расположен очень далеко от наблюдателя (рисунок 8) [9].

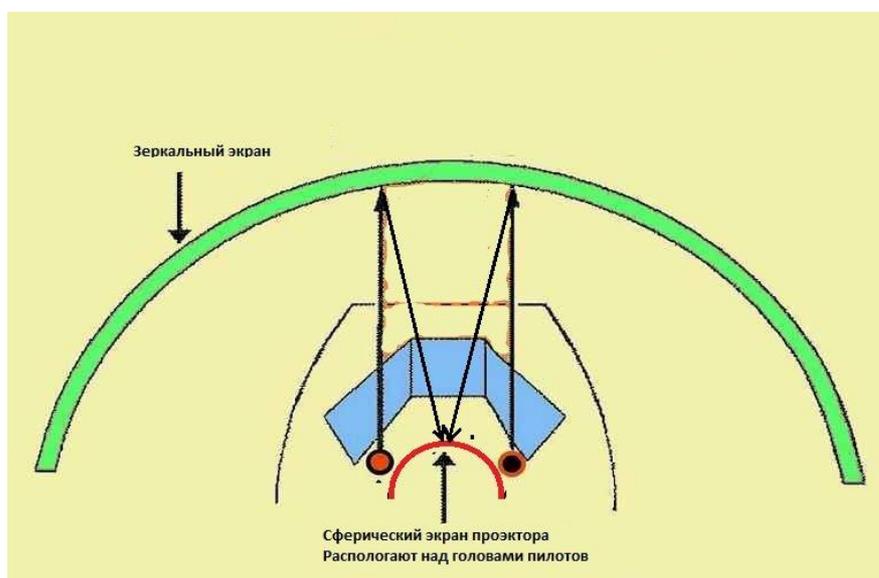


Рисунок 9 – Схема коллимированного изображения.

Заключение

В работе представлена структура комплекса полунатурного моделирования беспилотного летательного аппарата типа мультикоптер, позволяющего производить отработку систем управления как беспилотного летательного аппарата, так и оптических бортовых систем. Достоинством данного метода полунатурного моделирования является полноценность моделирования и снижения стоимости моделирования.

В дальнейшем планируется создание стенда полунатурного моделирования, отработка алгоритмов машинного зрения и системы управления БЛА типа мультикоптер.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы УМНИК.

Библиографический список

1. Огольцов И.И., Рожнин Н.Б., Шеваль В.В. Разработка математической модели пространственного полета квадрокоптера // Труды МАИ, 2015, №83: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62031>
2. Каримов А.Х. Цели и задачи, решаемые беспилотными авиационными комплексами нового поколения // Труды МАИ, 2011, №47: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=26769>

3. Peter Corke – Robotics, Vision and Control // Springer. Berlin. 2011. Paper 570.
4. Schmidt, Michael David. SIMULATION AND CONTROL OF A QUADROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE // University of Kentucky Master's Theses. 2011. Paper 93.
5. Белинская Ю.С., Четвериков В.Н. Управление четырехвинтовым вертолетом // Наука и образование. 2012. №5. С. 157-171.
6. D. Stewart, A Platform with Six Degrees of Freedom // UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings.1965. Vol 180.Pt 1. No 15.
7. Лапиков А.Л., Пащенко В.Н. Решение прямой задачи кинематики для платформы Гью-Стюарта с использованием аналитического уравнения плоскости // Наука и образование. 2014. №4. С. 124-134.
8. Naza-M v2 Quick Start Manual v1.28. DJI Inc. 2015:
<http://www.dji.com/naza-m-v2/download?lang=en>
9. Бюшгенс А. В небо, не отрываясь от земли // Наука и жизнь, 2008, №12: <http://www.nkj.ru/archive/articles/15095>