

**А.А. Макаренко<sup>1</sup>, А.Д. Макаров<sup>2</sup>, А.А. Власов<sup>2</sup>, Е.А. Моторин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

# ВАРИАНТ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ВЗЛЕТОМ И ПОСАДКОЙ

*В статье представлен вариант оптоэлектронной системы дистанционного измерения параметров посадочной площадки вертолета или конвертоплана.*

**Ключевые слова:** автоматическая посадка летательного аппарата, оптоэлектронная система, цифровая обработка изображения, лазер, дифракционная решетка.

Для цитирования: Макаренко А.А., Макаров А.Д., Власов А.А., Моторин Е.А. Вариант построения системы автоматической посадки беспилотного летательного аппарата с вертикальным взлетом и посадкой // Радиопромышленность. 2017. № 1. С. 96–103.

**A.A. Makarenko<sup>1</sup>, A.D. Makarov<sup>2</sup>, A.A. Vlasov<sup>2</sup>, E.A. Motorin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Joint-stock Company Research and Production Enterprise «Radar mms», Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint-Petersburg, Russia

# OPTION OF CONSTRUCTION OF AUTOMATIC LANDING SYSTEM FOR UNMANNED AIRCRAFT WITH VERTICAL TAKEOFF AND LANDING

*The article presents an option of optoelectronic system for remote measurement of parameters of landing area for helicopter or convertaplane.*

**Keywords:** automatic landing of aircraft, optoelectronic system, digital image processing, laser, diffraction grid.

For citation: Makarenko A. A., Makarov A. D., Vlasov A. A., Motorin E. A. Option of construction of automatic landing system for unmanned aircraft with vertical takeoff and landing. Radiopromyshlennost, 2017, no. 1, pp. 96–103 (In Russian).

Обеспечение автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом и посадкой (БЛАВВП), к которым относятся вертолеты или конвертопланы, является одной из самых сложных задач, стоящих перед разработчиками подобного рода транспортных средств.

Для осуществления автоматической посадки беспилотного вертолета или конвертоплана на выбранную или заданную в полетном задании площадь посадки необходимо определить пространственное положение этой площади, т.е. степень ее негоризонтальности. Такая мера необходима для

выяснения самой возможности посадки в намеченном месте, поскольку вертолет может осуществить успешное автоматическое приземление (и последующий взлет) только на поверхность, негоризонтальность которой не может превышать определенного значения – не более  $5^\circ$ . Поэтому дистанционное определение степени негоризонтальности площади посадки является первостепенной задачей, которую должна решить система автоматической посадки БЛАВВП. В случае применения летательных аппаратов вертолетного типа выполнение посадки дополнительно усложняется наличием так называемой «высоты невозврата» [1].

При выполнении посадки БЛАВВП на палубу морского или речного судна актуальным является вопрос выполнения этого маневра так называемым «сухим» методом, т.е. точно на палубу, а не на окружающую корабль водную поверхность с последующим поднятием на борт.

Кроме того, при выполнении ряда задач с использованием БЛАВВП создавать и поддерживать управляющий радиоканал для работы (и, соответственно, осуществления посадки) под управлением оператора не представляется возможным, ввиду того, что радиоканал является серьезным демаскирующим признаком, а также средством перехвата управления летательным аппаратом.

По результатам анализа литературы [2–9], в которой были изложены принципы построения и функционирования некоторых оптоэлектронных систем автоматической и автоматизированной посадки БЛАВВП, было выявлено, что рассмотренные там системы либо не осуществляют анализ площади посадки БЛАВВП вообще, либо выполняют только наблюдение за располагаемыми в районе площади посадки посадочными маяками.

Авторами предлагается вариант решения задачи измерения параметров площади посадки БЛАВВП при совместном применении лазерного

излучателя и оптоэлектронной аппаратуры наблюдения за зоной лазерного облучения площади предполагаемой посадки. Дистанционный анализ степени негоризонтальности площади посадки основан на следующих физических принципах: на ровной плоской поверхности, на которую предполагается осуществить посадку, используя лазерный излучатель зондирующих лучей, формируется испытательное изображение – точечная структура, созданная посредством применения дифракционной решетки. Выполняется наблюдение за площадью посадки с помощью оптоэлектронной камеры, ориентированной в надир. В результате анализа численных значений координат расположения пятен засветки на площади посадки осуществляется определение степени ее негоризонтальности. Далее принимается решение о возможности выполнения посадки и вычисляются значения режима полета в процессе снижения и приземления БЛАВВП.

Идеология работы разрабатываемой системы состоит в предоставлении бортовому автопилоту БЛАВВП достоверных и своевременных данных о состоянии и изменении параметров посадочной площадки, полученных методом оптического контроля. При помощи анализа данных измерительной системы становится возможным точно определить, подходит ли данная площадка для безаварийной посадки либо необходимо продолжать поиск. Концепция разрабатываемой системы представлена на рис. 1.

Излучатель оптического испытательного сигнала, входящий в систему автоматической посадки БЛАВВП, конструктивно состоит из трех блоков:

1. Устройство АРУ (для автоматической регулировки усиления оптического испытательного сигнала в зависимости от внешней засветки и времени суток).



Рисунок 1. Концепция оптико-электронной системы автоматической посадки БВК

2. Модулятор, который используется для обеспечения засветки предполагаемой посадочной площадки оптическим испытательным сигналом со специальными параметрами изменения яркости лазерного луча, позволяющими улучшить условия выделения этого сигнала наблюдательной телевизионной системой.
3. Оптический передатчик с проекционной насадкой, выполненный на основе лазерного диода и дифракционной решетки, формирующий испытательный оптический сигнал, по изменениям геометрических характеристик которого на предполагаемой посадочной площадке становится возможным вычисление степени негоризонтальности этой площадки.

Оптическая схема устройства формирования и передачи оптического испытательного сигнала содержит источник излучения (лазерный диод), коллиматорную линзу и двумерную дифракционную решетку (рис. 2). Такая схема позволяет построить тестовое изображение в виде двумерного массива точек. Координаты каждой точки при проецировании этого тестового изображения на плоскую поверхность, расположенную строго перпендикулярно ориентации оптической оси излучателя, точно известны. Координаты вычисляются на основе параметров и мест расположения лазерного диода, коллиматорной линзы и дифракционной решетки во время калибровки всей системы автоматической посадки при ее установке на БЛАВВП. На основе этих координат определяются уравнения проецирующих лучей в трехмерном пространстве. Эти уравнения являются информационной основой для всего вычислительного процесса определения степени негоризонтальности посадочной площадки.

Источником оптического излучения в разрабатываемом устройстве служит одномодовый лазерный диод с длиной волны 515–532 нм.

Для реализации алгоритма определения степени негоризонтальности площади посадки лазерные излучатели зондирующих лучей и наблюдательная телевизионная камера разнесены в пространстве на некоторое наперед заданное базовое расстояние  $L_1$ . Такое разнесение обеспечивает возможность измерения трехмерных пространственных координат наблюдаемой площади посадки.

Разработаем алгоритм определения степени негоризонтальности посадочной площадки БЛАВВП, используя материалы работы [10].

В пространстве заданы (рис. 3) нормальная земная система координат (СК)  $O_0X_gY_gZ_g$ , система координат гиросtabilизированной платформы  $O_VX_VY_VZ_V$ , плоскость  $X_VO_VZ_V$ , которой параллельна плоскости  $X_gO_0Z_g$  нормальной земной системы координат  $O_0X_gY_gZ_g$ , и связанная система координат

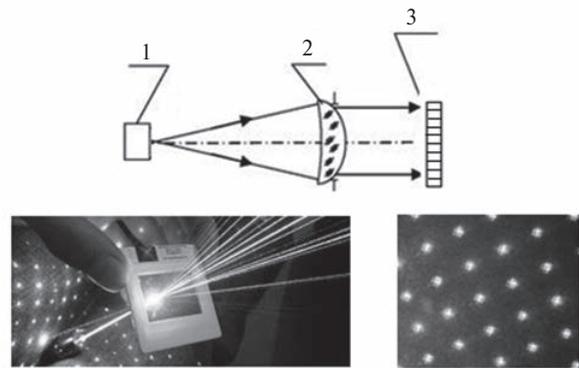


Рисунок 2. Комбинация компонентов схемы и получаемое изображение: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – двумерная дифракционная решетка

БЛАВВП  $OXYZ$ . Направления осей нормальной земной СК будем считать опорными. Начало координат СК гиросtabilизированной платформы совмещено с главной точкой объектива наблюдательной телевизионной камеры (центром проекции). Расстояние между началами координат нормальной земной СК и СК гиросtabilизированной платформы определяется вектором  $R$ . Направление осей связанной СК БЛАВВП  $OXYZ$  совпадает с направлениями его строительных осей: ось  $OX$  параллельна продольной оси БЛАВВП и направлена вперед, ось  $OZ$  параллельна поперечной оси БЛАВВП и направлена вправо по ходу летательного аппарата, ось  $OY$  перпендикулярна плоскости  $XOZ$ , расположена в плоскости симметрии летательного аппарата и направлена вверх.

На рис. 3 нанесены только три не лежащие на одной прямой точки из всего массива точек, сформированных посредством применения дифракционной решетки.

На гиросtabilизированной платформе установлена ориентированная в надиr наблюдательная оптико-электронная камера с фокусным расстоянием объектива  $f$  (расстояние до плоскости проекции  $P$ ) и угловым полем наблюдения  $40^\circ \times 60^\circ$ . Оптическая ось наблюдательной оптико-электронной камеры совмещена с осью  $O_VY_V$  СК  $O_VX_VY_VZ_V$  гиросtabilизированной платформы.

На гиросtabilизированной платформе размещен излучатель оптического испытательного сигнала. В СК гиросtabilизированной платформы заданы координаты точки схода прямых зондирующих лучей  $M(x_M y_M z_M)$  и координаты опорных точек каждого зондирующего луча  $A1(x_{A1} y_{A1} z_{A1})$ ,  $B1(x_{B1} y_{B1} z_{B1})$  и  $C1(x_{C1} y_{C1} z_{C1})$ , определенные на этапе калибровки всей системы автоматической посадки.

Зондирующие лучи  $MA1$ ,  $MB1$  и  $MC1$  формируют на площади посадки три пятна засветки –  $A(x_A y_A z_A)$ ,  $B(x_B y_B z_B)$  и  $C(x_C y_C z_C)$ . Эти пятна

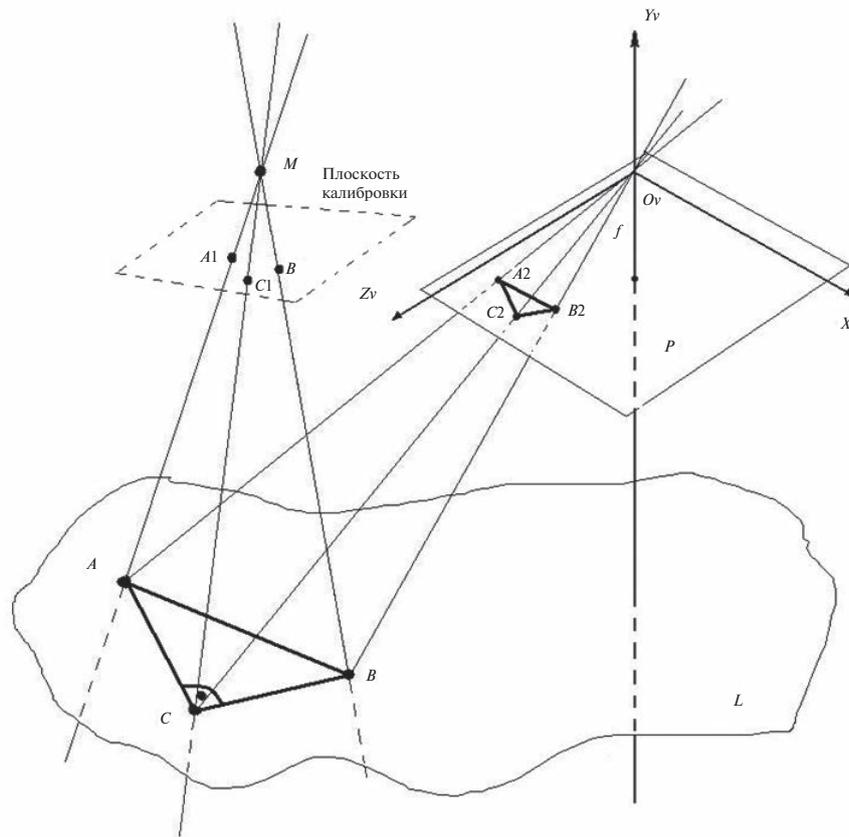


Рисунок 3. Пространственное положение плоскости посадочной площадки, плоскости калибровки и плоскости проекции

являются вершинами треугольника, образованного в результате пересечения плоскости площади посадки и пирамиды, ребрами которой являются зондирующие лучи. При нулевых углах крена  $\gamma$  и тангажа  $\theta$  БЛАВВП и положении площади посадки, параллельном плоскости  $X_V O_V Z_V$  СК  $O_V X_V Y_V Z_V$  гиросtabilизированной платформы, треугольник является прямоугольным.

Ставится задача в СК гиросtabilизированной платформы определить пространственные координаты точек  $A(x_A y_A z_A)$ ,  $B(x_B y_B z_B)$  и  $C(x_C y_C z_C)$  пересечения зондирующих лучей и плоскости площади посадки. Поскольку точки  $A(x_A y_A z_A)$ ,  $B(x_B y_B z_B)$  и  $C(x_C y_C z_C)$  принадлежат одной плоскости и не лежат на одной прямой, по найденным их координатам следует вывести аналитическое описание (уравнение) плоскости площади посадки  $L$ . Далее надо определить взаимное положение плоскостей  $L$  и  $X_V O_V Z_V$  (т.е. степень негоризонтальности плоскости площади посадки  $L$ ) и, как следствие, сделать заключение о возможности посадки БЛАВВП на выбранную площадь.

Определение в СК гиросtabilизированной платформы пространственных координат точек  $A(x_A y_A z_A)$ ,  $B(x_B y_B z_B)$  и  $C(x_C y_C z_C)$  (рис. 4) пересечения зондирующих лучей и плоскости площади посадки  $L$  выполняется по определенному алгоритму.

1. По значениям координат точек  $A1$ ,  $M$  и  $B1$  определяется аналитическое описание плоскости  $A1MB1$ :

$$\begin{vmatrix} x - x_{A1} & y - y_{A1} & z - z_{A1} \\ x_M - x_{A1} & y_M - y_{A1} & z_M - z_{A1} \\ x_{B1} - x_{A1} & y_{B1} - y_{A1} & z_{B1} - z_{A1} \end{vmatrix} = 0.$$

2. По значениям координат точек  $B1$ ,  $M$  и  $C1$  определяется аналитическое описание плоскости  $B1MC1$ :

$$\begin{vmatrix} x - x_{B1} & y - y_{B1} & z - z_{B1} \\ x_M - x_{B1} & y_M - y_{B1} & z_M - z_{B1} \\ x_{C1} - x_{B1} & y_{C1} - y_{B1} & z_{C1} - z_{B1} \end{vmatrix} = 0.$$

3. По значениям координат точек  $A1$ ,  $M$  и  $C1$  определяется аналитическое описание плоскости  $A1MC1$ :

$$\begin{vmatrix} x - x_{A1} & y - y_{A1} & z - z_{A1} \\ x_M - x_{A1} & y_M - y_{A1} & z_M - z_{A1} \\ x_{C1} - x_{A1} & y_{C1} - y_{A1} & z_{C1} - z_{A1} \end{vmatrix} = 0.$$

4. С плоскости проекции  $P$ , на которой расположена мишень оптоэлектронного преобразователя наблюдательной телевизионной камеры, в СК

гиростабилизированной платформы осуществляется съем координат точек  $A_2$ ,  $B_2$  и  $C_2$  – проекций точек  $A$ ,  $B$  и  $C$  пересечения зондирующих лучей и плоскости площади посадки  $L$ :

$$\begin{aligned} A_2(x_{A2}, f, z_{A2}); \\ B_2(x_{B2}, f, z_{A2}); \\ C_2(x_{C2}, f, z_{C2}). \end{aligned}$$

5. Вычисляются координаты точки пересечения проецирующего луча  $OA_2$  и плоскости  $A_1MB_1$  – искомые пространственные координаты точки  $A(x_A, y_A, z_A)$  – точки пересечения зондирующего луча  $MA_1$  и плоскости площади посадки  $L$ . Для этого решается система следующих уравнений, считая  $x$ ,  $y$  и  $z$  за неизвестные:

$$\frac{x}{x_{A2}} = \frac{y}{f} = \frac{z}{z_{A2}} = t1;$$

$$\begin{aligned} & x[(y_M - y_{A1})(z_{C1} - z_{A1}) - (y_{C1} - y_{A1})(z_M - z_{A1})] + \\ & + y[(x_{C1} - x_{A1})(z_M - z_{A1}) - (x_M - x_{A1})(z_{C1} - z_{A1})] + \\ & + z[(x_M - x_{A1})(y_{C1} - y_{A1}) - (x_{C1} - x_{A1})(y_M - y_{A1})] - \\ & - x_{A1}[(y_M - y_{A1})(z_{C1} - z_{A1}) - (y_{C1} - y_{A1})(z_M - z_{A1})] - \\ & - y_{A1}[(x_{C1} - x_{A1})(z_M - z_{A1}) - (x_M - x_{A1})(z_{C1} - z_{A1})] - \\ & - z_{A1}[(x_M - x_{A1})(y_{C1} - y_{A1}) - (x_{C1} - x_{A1})(y_M - y_{A1})] = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} t1 = & \frac{x_{A1}[(y_M - y_{A1})(z_{C1} - z_{A1}) - (y_{C1} - y_{A1})(z_M - z_{A1})] +}{x_{A2}[(y_M - y_{A1})(z_{C1} - z_{A1}) - (y_{C1} - y_{A1})(z_M - z_{A1})] +} \rightarrow \\ & \frac{+ y_{A1}[(x_{C1} - x_{A1})(z_M - z_{A1}) - (x_M - x_{A1})(z_{C1} - z_{A1})] +}{+ f[(x_{C1} - x_{A1})(z_M - z_{A1}) - (x_M - x_{A1})(z_{C1} - z_{A1})] +} \rightarrow \\ & \frac{+ z_{A1}[(x_M - x_{A1})(y_{C1} - y_{A1}) - (x_{C1} - x_{A1})(y_M - y_{A1})]}{+ z_{A2}[(x_M - x_{A1})(y_{C1} - y_{A1}) - (x_{C1} - x_{A1})(y_M - y_{A1})]}. \end{aligned}$$

Окончательно координаты точки  $A(x_A, y_A, z_A)$  вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} x_A &= x_{A2}t1; \\ y_A &= ft1; \\ z_A &= z_{A2}t1. \end{aligned}$$

6. Вычисляются координаты точки пересечения проецирующего луча  $OB_2$  и плоскости  $B_1MC_1$  – искомые пространственные координаты точки  $B(x_B, y_B, z_B)$  – точки пересечения зондирующего луча  $MB_1$  и плоскости площади посадки  $L$ . Для этого решается система следующих уравнений, считая  $x$ ,  $y$  и  $z$  за неизвестные:

$$\frac{x}{x_{B2}} = \frac{y}{f} = \frac{z}{z_{B2}} = t2;$$

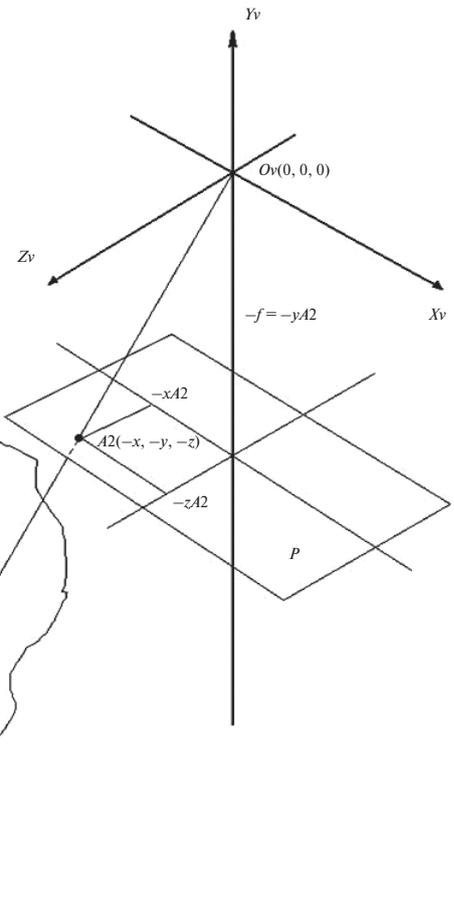


Рисунок 4. К Определению пространственных координат точек  $A(x_A, y_A, z_A)$ ,  $B(x_B, y_B, z_B)$  и  $C(x_C, y_C, z_C)$

$$\begin{aligned} & x[(y_M - y_{B1})(z_{C1} - z_{B1}) - (y_{C1} - y_{B1})(z_M - z_{B1})] + \\ & + y[(x_{C1} - x_{B1})(z_M - z_{B1}) - (x_M - x_{B1})(z_{C1} - z_{B1})] + \\ & + z[(x_M - x_{B1})(y_{C1} - y_{B1}) - (x_{C1} - x_{B1})(y_M - y_{B1})] - \\ & - x_{B1}[(y_M - y_{B1})(z_{C1} - z_{B1}) - (y_{C1} - y_{B1})(z_M - z_{B1})] - \\ & - y_{B1}[(x_{C1} - x_{B1})(z_M - z_{B1}) - (x_M - x_{B1})(z_{C1} - z_{B1})] - \\ & - z_{B1}[(x_M - x_{B1})(y_{C1} - y_{B1}) - (x_{C1} - x_{B1})(y_M - y_{B1})] = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} t2 = & \frac{x_{B1}[(y_M - y_{B1})(z_{C1} - z_{B1}) - (y_{C1} - y_{B1})(z_M - z_{B1})] +}{x_{B2}[(y_M - y_{B1})(z_{C1} - z_{B1}) - (y_{C1} - y_{B1})(z_M - z_{B1})] +} \rightarrow \\ & \frac{+ y_{B1}[(x_{C1} - x_{B1})(z_M - z_{B1}) - (x_M - x_{B1})(z_{C1} - z_{B1})] +}{+ f[(x_{C1} - x_{B1})(z_M - z_{B1}) - (x_M - x_{B1})(z_{C1} - z_{B1})] +} \rightarrow \\ & \frac{+ z_{B1}[(x_M - x_{B1})(y_{C1} - y_{B1}) - (x_{C1} - x_{B1})(y_M - y_{B1})]}{+ z_{B2}[(x_M - x_{B1})(y_{C1} - y_{B1}) - (x_{C1} - x_{B1})(y_M - y_{B1})]}. \end{aligned}$$

Окончательно координаты точки  $B(x_B, y_B, z_B)$  вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} x_B &= x_{B2}t2; \\ y_B &= ft2; \\ z_B &= z_{B2}t2. \end{aligned}$$

7. Вычисляются координаты точки пересечения проецирующего луча  $OC_2$  и плоскости  $A_1MC_1$  – искомые пространственные координаты точки  $C(x_C y_C z_C)$  – точки пересечения зондирующего луча  $MC_1$  и плоскости площади посадки  $L$ . Для этого решается система следующих уравнений, считая  $x$ ,  $y$  и  $z$  за неизвестные:

$$\frac{x}{xc_2} = \frac{y}{f} = \frac{z}{zc_2} = t_3;$$

$$\begin{aligned} & x[(y_M - y_{A1})(z_{C1} - z_{A1}) - (y_{C1} - y_{A1})(z_M - z_{A1})] + \\ & + y[(x_{C1} - x_{A1})(z_M - z_{A1}) - (x_M - x_{A1})(z_{C1} - z_{A1})] + \\ & + z[(x_M - x_{A1})(y_{C1} - y_{A1}) - (x_{C1} - x_{A1})(y_M - y_{A1})] - \\ & - x_{A1}[(y_M - y_{A1})(z_{C1} - z_{A1}) - (y_{C1} - y_{A1})(z_M - z_{A1})] - \\ & - y_{A1}[(x_{C1} - x_{A1})(z_M - z_{A1}) - (x_M - x_{A1})(z_{C1} - z_{A1})] - \\ & - z_{A1}[(x_M - x_{A1})(y_{C1} - y_{A1}) - (x_{C1} - x_{A1})(y_M - y_{A1})] = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} t_3 = & \frac{x_{A1}[(y_M - y_{A1})(z_{C1} - z_{A1}) - (y_{C1} - y_{A1})(z_M - z_{A1})] +}{xc_2[(y_M - y_{A1})(z_{C1} - z_{A1}) - (y_{C1} - y_{A1})(z_M - z_{A1})] +} \rightarrow \\ & + \frac{y_{A1}[(x_{C1} - x_{A1})(z_M - z_{A1}) - (x_M - x_{A1})(z_{C1} - z_{A1})] +}{f[(x_{C1} - x_{A1})(z_M - z_{A1}) - (x_M - x_{A1})(z_{C1} - z_{A1})] +} \rightarrow \\ & + \frac{z_{A1}[(x_M - x_{A1})(y_{C1} - y_{A1}) - (x_{C1} - x_{A1})(y_M - y_{A1})]}{+ zc_2[(x_M - x_{A1})(y_{C1} - y_{A1}) - (x_{C1} - x_{A1})(y_M - y_{A1})]}. \end{aligned}$$

Окончательно координаты точки  $C(x_C y_C z_C)$  вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} x_C &= xc_2 t_3; \\ y_C &= f t_3; \\ z_C &= zc_2 t_3. \end{aligned}$$

8. По значениям координат точек  $A(x_A y_A z_A)$ ,  $B(x_B y_B z_B)$  и  $C(x_C y_C z_C)$  выводится искомое аналитическое описание плоскости площади посадки  $L$ . Плоскость, проходящая через три различные точки, не лежащие на одной прямой, может быть описана следующим уравнением первой степени:

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} x - x_A & y - y_A & z - z_A \\ x_B - x_A & y_B - y_A & z_B - z_A \\ x_C - x_A & y_C - y_A & z_C - z_A \end{vmatrix} = \\ & = (x - x_A)[(y_B - y_A)(z_C - z_A) - (y_C - y_A)(z_B - z_A)] + \\ & + (y - y_A)[(x_C - x_A)(z_B - z_A) - (x_B - x_A)(z_C - z_A)] + \\ & + (z - z_A)[(x_B - x_A)(y_C - y_A) - (x_C - x_A)(y_B - y_A)] = \\ & = x[(y_B - y_A)(z_C - z_A) - (y_C - y_A)(z_B - z_A)] + \\ & + y[(x_C - x_A)(z_B - z_A) - (x_B - x_A)(z_C - z_A)] + \\ & + z[(x_B - x_A)(y_C - y_A) - (x_C - x_A)(y_B - y_A)] - \\ & - x_A[(y_B - y_A)(z_C - z_A) - (y_C - y_A)(z_B - z_A)] - \\ & - y_A[(x_C - x_A)(z_B - z_A) - (x_B - x_A)(z_C - z_A)] - \\ & - z_A[(x_B - x_A)(y_C - y_A) - (x_C - x_A)(y_B - y_A)] = 0. \end{aligned}$$

9. Определяются значения углов наклона площади посадки относительно осей СК гиросtabilизированной платформы – степень негоризонтальности площади посадки. Поскольку плоскость  $X_V O_V Z_V$  СК гиросtabilизированной платформы  $O_V X_V Y_V Z_V$  и плоскость  $X_g O_g Z_g$  нормальной земной СК  $O_g X_g Y_g Z_g$  параллельны, полученные значения углов наклона характеризуют положение площади посадки и нормальной земной СК.

Введя следующие обозначения:

$$\begin{aligned} K &= (y_B - y_A)(z_C - z_A) - (y_C - y_A)(z_B - z_A), \\ L &= (x_C - x_A)(z_B - z_A) - (x_B - x_A)(z_C - z_A), \\ M &= (x_B - x_A)(y_C - y_A) - (x_C - x_A)(y_B - y_A), \\ N &= -x_A[(y_B - y_A)(z_C - z_A) - (y_C - y_A)(z_B - z_A)] - \\ & - y_A[(x_C - x_A)(z_B - z_A) - (x_B - x_A)(z_C - z_A)] - \\ & - z_A[(x_B - x_A)(y_C - y_A) - (x_C - x_A)(y_B - y_A)], \end{aligned}$$

уравнение плоскости площади посадки  $L$  представляется в виде

$$Kx + Ly + Mz + N = 0.$$

Далее определяются значения полярных углов  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  и полярного расстояния  $p_1$  плоскости площади посадки  $L$  (длины перпендикуляра – ближайшего расстояния до площади посадки).

Длина вектора полярного расстояния  $p$

$$p_1 = \frac{|N|}{\sqrt{K^2 + L^2 + M^2}}.$$

Угол  $\alpha_1$  между направлением вектора полярного расстояния и осью  $O_V X_V$  в СК гиросtabilизированной платформы определяется из выражения

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{K}{\sqrt{K^2 + L^2 + M^2}}\right).$$

Угол  $\beta_1$  между направлением вектора полярного расстояния и осью  $O_V Y_V$  в СК гиросtabilизированной платформы определяется из выражения

$$\beta_1 = \arccos\left(\frac{L}{\sqrt{K^2 + L^2 + M^2}}\right).$$

Угол  $\gamma_1$  между направлением вектора полярного расстояния и осью  $O_V Z_V$  в СК гиросtabilизированной платформы определяется из выражения

$$\gamma_1 = \arccos\left(\frac{M}{\sqrt{K^2 + L^2 + M^2}}\right).$$

Конец алгоритма.

Если полученные значения полярных углов  $\alpha_1, \beta_1$  и  $\gamma_1$  соответствуют наклону площади посадки не более чем на  $5^\circ$  от горизонтального направления, параллельного направлению плоскости  $X_g O_g Z_g$  нормальной земной СК  $O_g X_g Y_g Z_g$ , посадка

на выбранную поверхность возможна. В противном случае посадка невозможна.

Предложенный вариант системы автоматической посадки БЛАВВП, в отличие от предложенной в работе [10], позволяет значительно точнее определять параметры площади посадки, поскольку вычислительная процедура выполняется не менее пяти раз с использованием различных наборов сформированных на ее поверхности точек. Использование

дифракционной решетки вместо отдельных лазерных излучателей упрощает конструкцию, улучшает технологичность применения и позволяет выполнить начальную калибровку системы автоматической посадки с более высокой точностью.

Экспериментальная проверка разработанного алгоритма доказала его эффективность и возможность реализации на современной элементной базе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тиняков Г. А. Пилотирование вертолета. М.: Книга по требованию, 2013. 192 с.
2. О навигационном обеспечении посадки дистанционно пилотируемого вертолета при воздействии ветра / А. Д. Барабанов, В. А. Осипов, В. А. Тупиков, Л. С. Турнецкий // Гироскопия и навигация. № 4. 2007. С. 32–41.
3. Барабанов А. Д., Осипов В. А., Турнецкий Л. С. Проблема палубной посадки дистанционно пилотируемого вертолета и пути ее решения // Труды 9-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», ВМФ России. СПб.: РАРАН, 2006.
4. Патент № 2214943 РФ, В64С13/18, В64F1/18, G05D1/00. Способ посадки летательного аппарата / Ю. Я. Алексеев, В. В. Дрогалин, А. И. Канащенко, В. И. Меркулов, В. Я. Рогов, О. Ф. Самарин, В. В. Францев. Заявитель: Открытое акционерное общество «Корпорация «Фазотрон – Научно-исследовательский институт радиостроения», патентообладатель: Открытое акционерное общество «Корпорация «Фазотрон – Научно-исследовательский институт радиостроения», № заявки 2002124532/28, 16.09.2002, приоритет 16.09.2002, опубликовано 27.10.2003.
5. Патент № 2353552 РФ, В64D45/04, Способ посадки летательного аппарата / Г. В. Анцев, Л. С. Турнецкий, В. А. Тупиков, А. Д. Барабанов, В. А. Осипов. Заявитель: Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», № заявки: 2007134537/11, 17.09.2007, приоритет 17.09.2007, опубликовано 27.04.2009.
6. Распов В. Я. и др. Комплексированные микросистемы ориентации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Труды 18-й МКМАНУД. С. 161.
7. Нестеренко О. И. и др. Интегрированная инерциально-оптическая система ориентации. Труды 18-й МКМАНУД, 170 с.
8. Zhao H., Qi Y. The error analysis and correction method research of the attitude data for the UAV remote sensing images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII, Part B1, Beijing 2008, p. 1243.
9. Система автоматической посадки [Электронный ресурс]. URL: Адрес доступа: <http://venture-biz.ru/tekhnologii-innovatsii/56-sistema-avtomaticheskoy-posadki>
10. Барабанов А. Д., Макаренко А. А., Турнецкий Л. С. Бортовая оптоэлектронная система оценки параметров посадочной площадки для вертолета // Сб. трудов 15-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности. Военно-морской флот России». Т. 4. СПб.: НПО СМ – РАРАН, 2012. С. 236–241.

## REFERENCES

1. Tinyakov G. A. *Pilotirovanie vertoleta* [Piloting a helicopter]. M.: Kniga po trebovaniyu Publ., 2013. 192 p. (In Russian).
2. Barabanov A. D., Osipov V. A., Tupikov V. A., Turnetskiy L. S. On navigation support for landing of remotely piloted helicopter exposed to wind. *Гироскопия и навигация*, № 4, 2007, С. 32–41 (In Russian).
3. Barabanov A. D., Osipov V. A., Turnetskiy L. S. Problem of deck landing of remotely piloted helicopter and solution methods. *Works of the 9th All-Russian scientific & practical conference on relevant problems of protection and security. Russian Navy*. Saint-Petersburg, Russian Academy of Missile and Ammunition Sciences, 2006 (In Russian).
4. RF patent No.2214943, B64C13/18, B64F1/18, G05D1/00. Method of aircraft landing. Yu. Y. Alekseev, V. V. Drogalin, A. I. Kanashchenkov, V. I. Merkulov, V. Y. Rogov, O. F. Samarin, V. V. Frantsev. Applicant: Open Joint-Stock Company «Corporation “Phazotron” – Scientific-Research Institute of Radio Engineering», patentee: Open Joint Stock Company «Corporation “Phazotron” – Scientific-Research Institute of Radioengineering», Application No. 2002124532/28, 16.09.2002, priority: 16.09.2002, published on 27.10.2003.
5. RF patent No.2353552 RF, B64D45/04, Method of aircraft landing. G. V. Antsev, L. S. Turnetskiy, V. A. Tupikov, A. D. Barabanov, V. A. Osipov. Applicant: Open Joint Stock Company «Scientific and Production Enterprise “Radar mms”», patentee: Open Joint Stock Company “Scientific & production enterprise “Radar mms”, application No. 2007134537/11, 17.09.2007, priority: 17.09.2007, published on 27.04.2009.
6. Paspov V. Y. i dr. Complexed micro systems of orientation of small-sized UAVs. *Scientific works of the 18th MKMANUD*, pp. 161 (In Russian).
7. Nesterenko O. I. et al. Integrated inertial-optical orientation system. *Works of the 18th MKMANUD*, 170 p. (In Russian).
8. Zhao H., Qi Y. The error analysis and correction method research of the attitude data for the UAV remote sensing images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII, Part B1, Beijing 2008, p. 1243.
9. Automatic landing system (In Russian). Available at: <http://venture-biz.ru/tekhnologii-innovatsii/56-sistema-avtomaticheskoy-posadki>

10. Barabanov A. D., Makarenko A. A., Turnetskiy L. S. Onboard optoelectronic system for evaluation of parameters of helicopter landing pad. *Coll. of works of the 15th All-Russian scientific & practical conference on «Actual problems of protection and safety. Navy of Russia»*, Vol. 4. Saint-Petersburg, SPA-RAS MAS, 2012, pp. 236–241 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Макаренко Александр Александрович**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д.37, лит. А, e-mail: a\_makarenko@mail.ru.

**Макаров Анатолий Дмитриевич**, аспирант, Санкт-Петербургский Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д.49, e-mail: trolikmag@yandex.ru.

**Власов Александр Андреевич**, аспирант, Санкт-Петербургский Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д.49, e-mail: salusnetklim@yandex.ru.

**Моторин Евгений Анатольевич**, аспирант, Санкт-Петербургский Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д.49, e-mail: kaktuss001@yandex.ru.

## AUTHORS

**Makarenko Aleksandr**, PhD, Associate Professor, senior researcher fellow, Joint-stock Company Research and Production Enterprise «Radar mms», 37, Lit. A, Novoselkovskaya st., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, e-mail: a\_makarenko@mail.ru.

**Makarov Anatoliy**, postgraduate student, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverksky pr-t, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: trolikmag@yandex.ru.

**Vlasov Aleksandr**, postgraduate student, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optic, 49, Kronverksky pr-t, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: salusnetklim@yandex.ru.

**Motorin Evgeniy**, postgraduate student, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optic, 49, Kronverksky pr-t, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: kaktuss001@yandex.ru.