Вариант построения системы автоматической посадки палубного беспилотного вертолета

Option for building an automatic landing system for a deck-mounted unmanned helicopter

Карманов / Karmanov A.
Андрей Геннадиевич
(karmanov.nip@gmail.com)
кандидат технических наук, доцент.
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО),
доцент факультета инфокомуникационных технологий.
г. Санкт-Петербург

Карманова / Karmanova N.
Наталия Андреевна
(karmanov.nip@gmail.com)
Университет ИТМО,
инженер научно-технического отдела.
г. Санкт-Петербург

Макаренко / Makarenko A.
Александр Александрович
(a_makarenko@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
Университет ИТМО, доцент факультета лазерной фотоники и олгоэлектроники.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: БПЛА – UAV; автоматическая посадка – automatic landing; оптоэлектронные системы – optoelectronic systems.

В статье представлен вариант оптикоэлектронной системы дистанционного измерения параметров посадочной площадки палубного беспилотного вертолета или конвертоплана за счет совместного применения лазерного излучателя и оптикоэлектронной аппаратуры наблюдения за зоной лазерного облучения площади предполагаемой посадки.

The article is devoted to the issues of failure detection. The article presents an option of an optoelectronic system for remote measurement of landing pad parameters of a deck-mounted unmanned helicopter or tiltrotor.

Обеспечение автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа (БПЛА ВТ) или конвертоплана, 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°. Поэтому дистанционное определение степени негоризонтальности площади посадки является первостепенной задачей, которую должна решить система автоматической посадки БПЛА ВТ. В случае применения летательных аппаратов вертолетного типа выполнение посадки дополнительно усложняется наличием так называемой «высоты невозврата» [1].

При выполнении посадки БПЛА ВТ 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 БПЛА ВТ 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 автома-

2-2020.indd 94 23.06.2020 9:26:40

тической и автоматизированной посадки БПЛА ВТ, было выявлено, что рассмотренные там системы либо не осуществляют анализ площади посадки БПЛА ВТ вообще, либо выполняют только наблюдение за располагаемыми в районе площади посадки посадочными маяками.

Авторами предлагается вариант решения задачи измерения параметров площади посадки БПЛА ВТ при совместном применении лазерного излучателя и оптикоэлектронной 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 БПЛА ВТ.

Идеология работы разрабатываемой системы состоит в предоставлении бортовому автопилоту БПЛА ВТ 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 БПЛА ВТ, конструктивно состоит из трех блоков:

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

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,

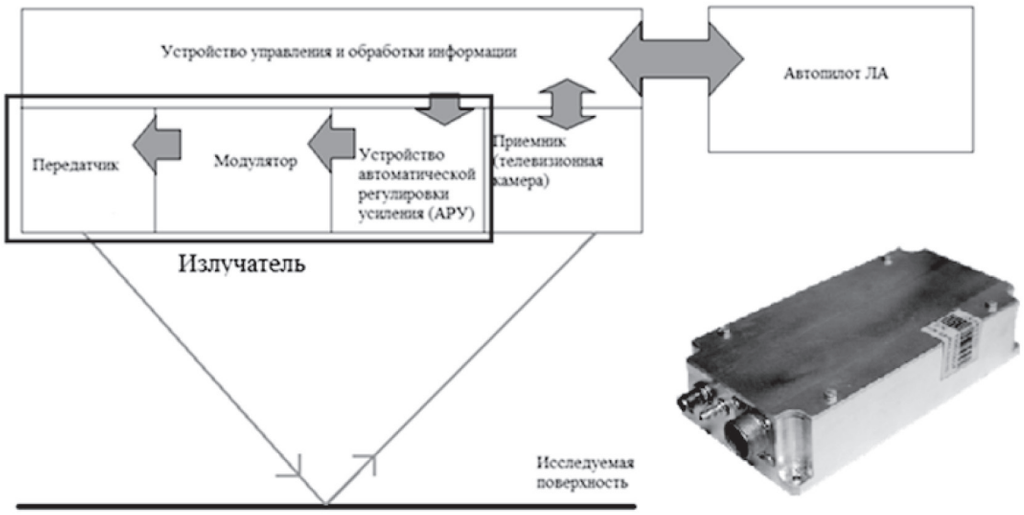

Рис. 1. Концепция оптико-электронной системы автоматической посадки БВК

2-2020.indd 95 23.06.2020 9:26:40

коллиматорной линзы и дифракционной решетки во время калибровки всей системы автоматической посадки при ее установке на БПЛА ВТ. 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 L1. Такое разнесение обеспечивает возможность измерения трехмерных пространственных координат наблюдаемой площади посадки.

Разработаем алгоритм определения степени отклонения от горизонта посадочной площадки БПЛА ВТ, используя материалы работы [10].

В пространстве заданы (рис. 3) нормальная земная система координат (СК) $O_0X_gY_gZ_g$, система координат гиростабилизированной платформы $O_yX_yY_yZ_y$, плоскость $X_yO_yZ_y$которой параллельна плоскости $X_gO_0Z_g$ нормальной земной системы координат $O_0X_gY_gZ_g$, и связанная система координат БПЛА ВТ $OXYZ$. Направления осей нормальной земной СК будем считать опорными. Начало координат СК гиростабилизированной платформы совмещено с главной точкой объектива наблюдательной телевизионной камеры (центром проекции). Расстояние между началами координат нормальной земной СК и СК гиростабилизированной платформы определяется вектором R. Направление осей связанной СК БПЛА ВТ $OXYZ$совпадает с направлениями его строительных осей: ось OX параллельна продольной оси БПЛА ВТ и направлена вперед, ось OZпараллельна поперечной оси БПЛА ВТ 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 гиростабилизированной платформе установлена ориентированная в надир наблюдательная оптико-электронная камера с фокусным расстоянием объектива f (расстояние до плоскости проекции P) и угловым полем наблюдения 40°x60°. Оптическая ось наблюдательной оптико-электронной камеры совмещена с осью СК O_VY_V СК $O_VX_VY_VZ_V$ гиростабилизированной платформы.

На гиростабилизированной платформе размещен излучатель оптического испытательного сигнала. В СК гиростабилизированной платформы заданы координаты точки схода прямых зондирующих лучей $M(x_My_Mz_M)$ 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 – $A(x_Ay_Az_A)$, $B(x_By_Bz_B)$и $C(x_Cy_Cz_C)$. Эти пятна являются вершинами треугольника, образованного в результате пересечения плоскости площади посадки и пирамиды, ребрами которой являются зондирующие лучи. При нулевых углах крена γ и тангажа θ БПЛА ВТ и положении площади посадки, параллельном плоскости $X_VO_VZ_V$ СК $O_VX_VY_VZ_V$ гиростабилизированной платформы, треугольник является прямоугольным.

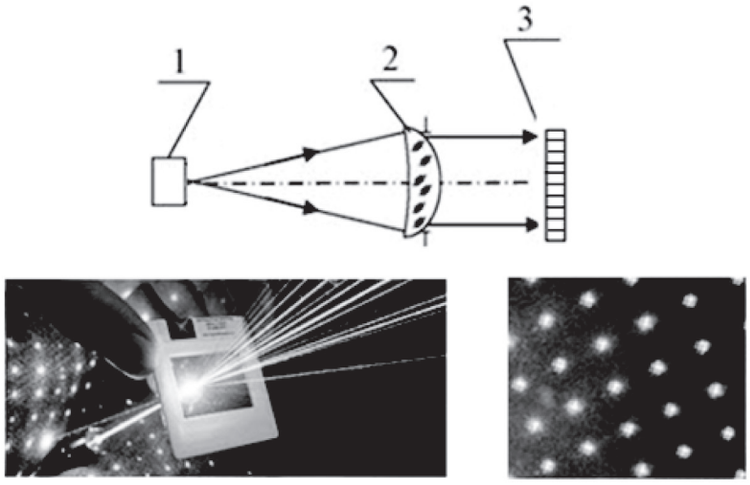

Рис. 2. Комбинация компонентов схемы и получаемое изображение:
1 – источник излучения, 2 – коллиматор, 3 – двумерная дифракционная решетка

2-2020.indd 96 23.06.2020 9:26:42

Ставится задача в СК гиростабилизированной 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 отклонения горизонт плоскости площади посадки L) и, как следствие, сделать заключение о возможности посадки БПЛА ВТ на выбранную площадь.

Определение в СК гиростабилизированной 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 следующему 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 $A1MC1$:

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

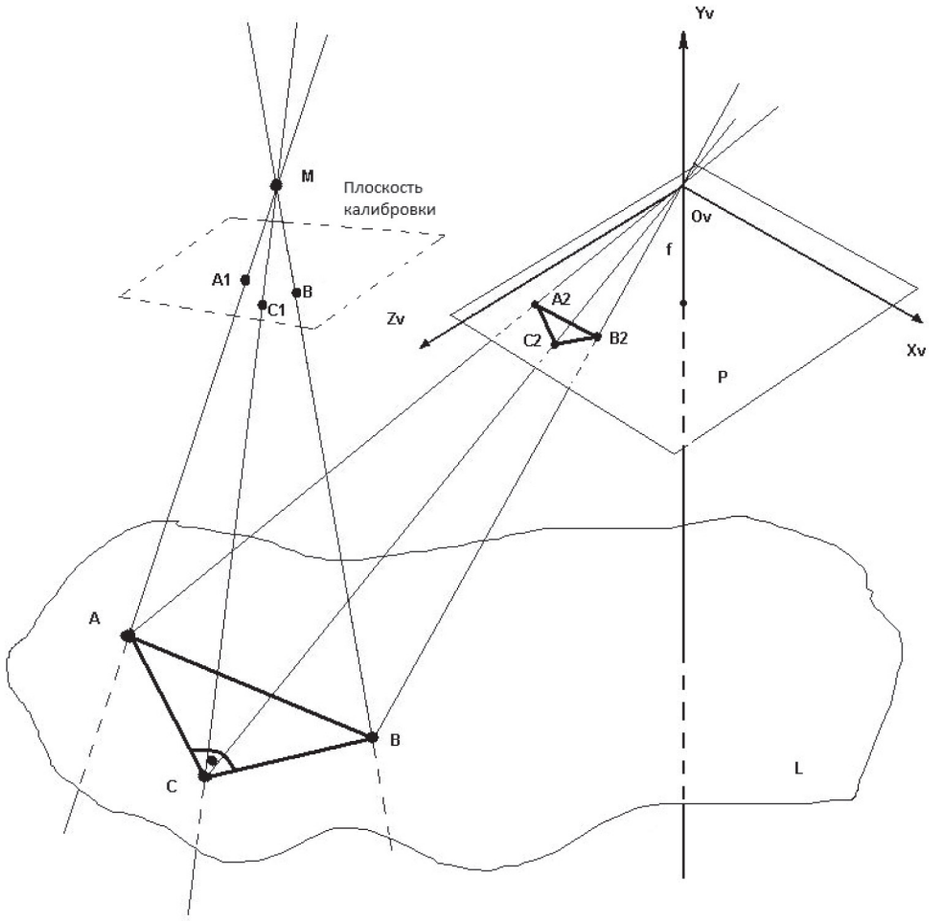

Рис. 3. К пояснению алгоритма определения степени отклонения от горизонта площади посадки

2-2020.indd 97 23.06.2020 9:26:43

4. С плоскости проекции P, на которой расположена мишень оптоэлектронного преобразователя наблюдательной телевизионной камеры, в СК гиростабилизированной платформы осуществляется съем координат точек $A2$, $B2$ и $C2$ – проекций точек A, B и C пересечения зондирующих лучей и плоскости площади посадки L:

$$A2(x_{A2}, f, z_{A2});\ B2(x_{B2}, f, z_{A2});\ C2(x_{C2}, f, z_{C2}).$$

5. Вычисляются координаты точки пересечения проецирующего луча $OA2$ и плоскости $A1MB1$ – искомые пространственные координаты точки $A(x_A y_A z_A)$ – точки пересечения зондирующего луча $MA1$ и плоскости площади посадки L. Для этого решается система следующих уравнений, считая x, y и z за неизвестные:

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

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

откуда

$$t1 = \frac{x_{A1}\cdot\left[\left(y_M - y_{A1}\right)\cdot\left(z_{C1} - z_{A1}\right) - \left(y_{C1} - y_{A1}\right)\cdot\left(z_M - z_{A1}\right)\right] + \cdots}{x_{A2}\cdot\left[\left(y_M - y_{A1}\right)\cdot\left(z_{C1} - z_{A1}\right) - \left(y_{C1} - y_{A1}\right)\cdot\left(z_M - z_{A1}\right)\right] + \cdots} \rightarrow$$

$$\frac{+y_{A1}\cdot\left[\left(x_{C1} - x_{A1}\right)\cdot\left(z_M - z_{A1}\right) - \left(x_M - x_{A1}\right)\cdot\left(z_{C1} - z_{A1}\right)\right] + \cdots}{+f\cdot\left[\left(x_{C1} - x_{A1}\right)\cdot\left(z_M - z_{A1}\right) - \left(x_M - x_{A1}\right)\cdot\left(z_{C1} - z_{A1}\right)\right] + \cdots} \rightarrow$$

$$\frac{+z_{A1}\cdot\left[\left(x_M - x_{A1}\right)\cdot\left(y_{C1} - y_{A1}\right) - \left(x_{C1} - x_{A1}\right)\cdot\left(y_M - y_{A1}\right)\right]}{+z_{A2}\cdot\left[\left(x_M - x_{A1}\right)\cdot\left(y_{C1} - y_{A1}\right) - \left(x_{C1} - x_{A1}\right)\cdot\left(y_M - y_{A1}\right)\right]}.$$

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

$$x_A = x_{A2}\cdot t1;\ y_A = f\cdot t1;\ z_A = z_{A2}\cdot t1.$$

6. Вычисляются координаты точки пересечения проецирующего луча $OB2$ и плоскости $B1MC1$ – искомые пространственные координаты точки $B(x_B y_B z_B)$ – точки пересечения зондирующего луча $MB1$ и плоскости площади посадки L. Для этого решается система следующих уравнений, считая x, y и z за неизвестные:

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

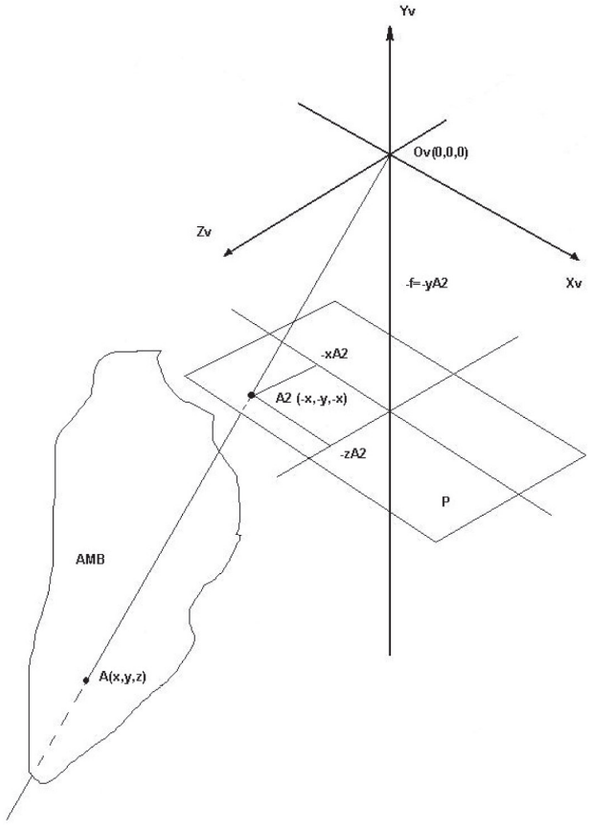

Рис. 4. К пояснению алгоритма определения пространственных координат точек $A(x_A y_A z_A)$, $B(x_B y_B z_B)$ и $C(x_C y_C z_C)$

2-2020.indd 98 23.06.2020 9:26:48

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

откуда

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

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

$$x_B=x_{B2}\cdot t2;\;\; y_B=f\cdot t2;\;\; z_B=z_{B2}\cdot t2.$$

7. Вычисляются координаты точки пересечения проецирующего луча $OC2$ и плоскости $A1MC1$ – искомые пространственные координаты точки $C(x_C y_C z_C)$ – точки пересечения зондирующего луча $MC1$ и плоскости площади посадки L. Для этого решается система следующих уравнений, считая *x, y* и *z* за неизвестные:

$$\frac{x}{x_{C2}}=\frac{y}{f}=\frac{z}{z_{C2}}=t3\;;$$

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

откуда

$$t3=\frac{\begin{aligned}&x_{A1}\cdot\left[\left(y_M-y_{A1}\right)\cdot\left(z_{C1}-z_{A1}\right)-\left(y_{C1}-y_{A1}\right)\cdot\left(z_M-z_{A1}\right)\right]+\\&+y_{A1}\cdot\left[\left(x_{C1}-x_{A1}\right)\cdot\left(z_M-z_{A1}\right)-\left(x_M-x_{A1}\right)\cdot\left(z_{C1}-z_{A1}\right)\right]+\\&+z_{A1}\cdot\left[\left(x_M-x_{A1}\right)\cdot\left(y_{C1}-y_{A1}\right)-\left(x_{C1}-x_{A1}\right)\cdot\left(y_M-y_{A1}\right)\right]\end{aligned}}{\begin{aligned}&x_{C2}\cdot\left[\left(y_M-y_{A1}\right)\cdot\left(z_{C1}-z_{A1}\right)-\left(y_{C1}-y_{A1}\right)\cdot\left(z_M-z_{A1}\right)\right]+\\&+f\cdot\left[\left(x_{C1}-x_{A1}\right)\cdot\left(z_M-z_{A1}\right)-\left(x_M-x_{A1}\right)\cdot\left(z_{C1}-z_{A1}\right)\right]+\\&+z_{C2}\cdot\left[\left(x_M-x_{A1}\right)\cdot\left(y_{C1}-y_{A1}\right)-\left(x_{C1}-x_{A1}\right)\cdot\left(y_M-y_{A1}\right)\right]\end{aligned}}\rightarrow.$$

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

$$x_C=x_{C2}\cdot t3;\;\; y_C=f\cdot t3;\;\; z_C=z_{C2}\cdot t3.$$

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:

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

9. Определяются значения углов наклона площади посадки относительно осей СК гиростабилизированной платформы – степень негоризонтальности площади посадки. Поскольку плоскость $X_V O_V Z_V$ СК гиростабилизированной платформы $O_V X_V Y_V Z_V$ и плоскость $X_g O_0 Z_g$ нормальной земной СК $O_0 X_g Y_g Z_g$ параллельны, полученные значения углов наклона характеризуют положение площади посадки и нормальной земной СК.

Введя следующие обозначения:

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

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 $p1$ плоскости площади посадки L (длины перпендикуляра – ближайшего расстояния до площади посадки).

2-2020.indd 99 23.06.2020 9:26:52

Длина вектора полярного расстояния p

$$p1 = \frac{|N|}{\sqrt{K^2 + L^2 + M^2}} .$$

Угол α1 между направлением вектора полярного расстояния и осью $O_V X_V$ в СК гиростабилизированной платформы определяется из выражения

$$\alpha 1 = \arccos\left(\frac{K}{\sqrt{K^2 + L^2 + M^2}}\right) .$$

Угол β1 между направлением вектора полярного расстояния и осью $O_V Y_V$ в СК гиростабилизированной платформы определяется из выражения

$$\beta 1 = \arccos\left(\frac{L}{\sqrt{K^2 + L^2 + M^2}}\right) .$$

Угол γ1 между направлением вектора полярного расстояния и осью $O_V Z_V$ в СК гиростабилизированной платформы определяется из выражения

$$\gamma 1 = \arccos\left(\frac{M}{\sqrt{K^2 + L^2 + M^2}}\right) .$$

Если полученные значения полярных углов α1, β1и γ1 соответствуют наклону площади посадки не более чем на 5° от горизонтального направления, параллельного направлению плоскости $X_g O_0 Z_g$нормальной земной СК $O_0 X_g Y_g Z_g$,посадка на выбранную поверхность возможна. В противном случае посадка невозможна.

Выводы

Предложенный вариант системы автоматической посадки БПЛА ВТ, 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.

Литература

1. Тиняков, Г. А. Пилотирование вертолета / Г.А. Тиняков. – М.: Книга по требованию, 2013. – 192 с.

2. О навигационном обеспечении посадки дистанционно пилотируемого вертолета при воздействии ветра /А.Д. Барабанов [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 4. – С. 32–41.

3. Барабанов, А.Д. Проблема палубной посадки дистанционно пилотируемого вертолета и пути ее решения / А.Д. Барабанов, В.А. Осипов, Л.С. Турнецкий // Труды 9-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», ВМФ России, 2006.

4. Пат. №2214943 Российская Федерация, МПК B64C13/18, B64F1/18, G05D1/00. Способ посадки летательного аппарата / Ю.Я. Алексеев [и др.]; патентообладатель: Открытое акционерное общество «Корпорация "Фазотрон – Научно-исследовательский институт радиостроения», № 2002124532/28; заявл. 16.09.2002; опубл. 27.10.2003.

5. Пат. №2353552 Российская Федерация, МПК B64D45/04. Способ посадки летательного аппарата / Г.В. Анцев [и др.]; патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие "Радар ммс"», №2007134537/11; заявл. 17.09.2007; опубл. 27.04.2009.

6. Комплексированные микросистемы ориентации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / В.Я. Распопов [и др.] // Сб. трудов 18-ой Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам 30 мая – 01 июня 2011г. – 2011. – С. 161.

7. Интегрированная инерциально-оптическая система ориентации / О.И. Нестеренко [и др.] // Сб. трудов 18-ой Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам 30 мая – 01 июня 2011 г. – 2011. – С. 170.

8. Zhao, H. The error analysis and correction method research of the attitude data for the UAV remote sensing images / H. Zhao, Y. Qi // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – Vol. XXXVII, Part B1. – P. 1243.

9. Система автоматической посадки [Электронный ресурс] // Сайт УК «Альянс. Венчурный бизнес. – Режим доступа: http://venture-biz.ru/tekhnologii-innovatsii/56-sistema-avtomaticheskoy-posadki, свободный. – Загл. с экрана.

10. Барабанов, А. Д. Бортовая оптоэлектронная система оценки параметров посадочной площадки для вертолета / А.Д. Барабанов, А.А. Макаренко, Л.С. Турнецкий // Сб. трудов 15-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности. Военно-морской флот России», 2012. – Т. 4. – С. 236–241.

2-2020.indd 100 23.06.2020 9:26:53