

УДК 623.746.07519

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ПРИВЕДЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ДВИЖУЩЕЕСЯ СУДНО

**Ю. Ф. Подплёкин,**

доктор техн. наук, первый заместитель генерального директора по науке

**С. Г. Толмачёв,**

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

**С. Н. Шаров,**

доктор техн. наук, начальник лаборатории

ОАО «Концерн «Гранит-Электрон», г. Санкт-Петербург

Предложены технические решения, обеспечивающие посадку беспилотного летательного аппарата на посадочное устройство движущегося судна. Приведены результаты моделирования, показывающие, что предложенные варианты управления в условиях качки судна позволяют обеспечить требуемую точность приведения летательного аппарата в точку посадки.

**Ключевые слова** — беспилотный летательный аппарат, судно, информационно-управляющая система.

### Введение

Ведение длительного наблюдения (мониторинга) за состоянием водной поверхности и прилегающих к ней районов является одним из наиболее перспективных направлений с точки зрения целесообразности применения судовых комплексов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) военного и гражданского назначения [1–4].

Наиболее сложной, проблемной и дорогостоящей частью решения данной задачи может быть осуществление постоянного мониторинга обширных районов морских и океанских акваторий. Применение с этой целью авиационных комплексов с их основным преимуществом в течение сравнительно короткого времени производить осмотр достаточно больших площадей акваторий с помощью бортовых средств поиска и обнаружения наиболее оправдано. Использование в этом случае БПЛА способно существенно уменьшить стоимость задания и риск потери личного состава в сравнении с пилотируемыми летательными аппаратами самолетного и вертолетного типа.

Однако проблема возвращения БПЛА на движущееся судно-носитель до сих пор не имеет удовлетворительного решения. В настоящей статье рассмотрим особенности функционирования информационно-управляющей системы БПЛА

и судна [2] для обеспечения посадки БПЛА в условиях качки.

### Особенности траектории возвращения БПЛА на движущееся судно

При составлении полетного задания движения БПЛА для выполнения мониторинга заданного участка водной или земной поверхности рассчитываются время и маршрут его возвращения для посадки на судно. Для этой цели определяется расчетная точка местонахождения судна в момент прихода на посадку БПЛА с учетом особенностей движения судна. Однако при выполнении программы полета движение БПЛА, заданное полетным заданием, может существенно меняться по команде с пульта управления в зависимости от результатов текущей информации мониторинга или изменения маршрута движения судна. В связи с этим необходимо во время полета контролировать возможность возвращения БПЛА на судно. Для этого необходимо определить длину минимального пути возвращения с учетом маневров разворота БПЛА в сторону судна и подхода к посадочному устройству.

Траектория возвращения — движение БПЛА, находящегося в момент начала сближения в точке  $A_0$  с вектором скорости  $V_A$  в точку  $P_T$ , где про-

исходит его зацепление посадочным устройством (посадка). Полагаем, что рассматриваемая траектория лежит в плоскости, проходящей через точки  $A_0$ ,  $\Pi_T$  и вектор  $V_A$  (рис. 1).

В момент времени  $t = 0$  (начало маневра сближения) БПЛА находится в точке  $A_0$  с координатами  $X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0}$ , имеет скорость  $V_A$  и направление движения  $\Phi_{A0}(\psi_0, \vartheta_0)$ . В этот момент судно с устройством посадки (причаливания) находится в точке  $\Pi_0$  с координатами  $X_{\Pi_0}, Y_{\Pi_0}, Z_{\Pi_0}$ , имеет скорость  $V_{\Pi_0}$  и направление движения  $\Phi_{\Pi_0}(\psi_{\Pi_0}, \vartheta_{\Pi_0})$ . Прогнозируемые координаты положения судна в момент  $t_{\Pi} = T$  стыковки БПЛА с посадочным устройством обозначим  $X_{\Pi T}, Z_{\Pi T}$ . Траектория сближения лежит в плоскости  $(A_0, \Pi_T, V_{\Pi T})$ , уравнение которой в общем виде

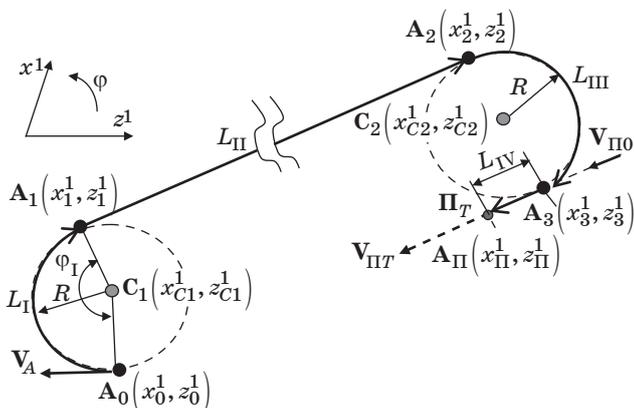
$$B_X(x - x_0) + B_Y(y - y_0) + B_Z(z - z_0) = 0, \quad (1)$$

где коэффициенты  $B_X, B_Y, B_Z$  определяются из условий принадлежности точек  $A_0, \Pi_T$  и вектора  $V_{\Pi T}$  этой плоскости (1).

В новой системе координат вся траектория сближения от  $A_0$  до  $A_3$  находится в плоскости  $x^1, z^1$  (см. рис. 1). Это справедливо в случае, если углы  $\vartheta$  наклона вектора скорости БПЛА и носителя в вертикальной плоскости близки друг к другу по величине. На этом рисунке показаны направления осей  $x^1, z^1$ , а также положительное направление поворота в плоскости.

В общем случае траектория сближения состоит из четырех характерных частей. Первая часть, соответствующая развороту БПЛА в сторону посадки, — от точки начального положения БПЛА  $A_0$  до точки окончания маневра разворота  $A_1$ .

Если пренебречь инерционностью системы управления БПЛА, то можно считать, что маневр происходит в плоскости (1) по дуге окружности минимально возможного радиуса  $R$  с центром в точке  $C_1(x_{C1}^1, z_{C1}^1)$ . При этом



■ Рис. 1. Типовая траектория возвращения БПЛА

$$x_{C1}^1 = x_0^1 + R \sin \psi_0; \quad z_{C1}^1 = z_0^1 + R \cos \psi_0, \quad (2)$$

где  $R$  — радиус маневра разворота БПЛА, который определяется допустимой величиной боковой перегрузки и допустимой величиной угла скольжения.

Длина первого участка  $L_I = \varphi_I R$ , где  $\varphi_I$  — угловое расстояние между  $A_0$  и  $A_1$ .

Вторая часть траектории сближения — прямолинейный участок, соединяющий точку окончания первого маневра  $A_1$  и точку  $A_2$ , соответствующую началу второго маневра выхода на курс судна с посадочным устройством. Маневр третьего участка — движение по окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $C_2$ .

Длина этого участка равна расстоянию между центрами окружностей первого и второго разворота БПЛА, т. е.  $L_{II} = |C_2 - C_1|$ . Курсовой угол движения БПЛА на этом участке, соответственно:  $\varphi_{A2} = \arg(C_2 - C_1)$ .

Третья часть траектории сближения — движение по окружности от точки  $A_2$  до точки  $A_3$ , в которой направление движения БПЛА совпадает с направлением движения носителя посадочного устройства. Длина этого участка  $L_{III} = \varphi_{III} R$ , где  $\varphi_{III}$  — угловое расстояние между точками  $A_2$  и  $A_3$ .

Последний, четвертый участок — движение, близкое к прямолинейному, по курсу носителя между точками  $A_3$  и конечной точкой  $A_{\Pi}$  посадки БПЛА, совпадающей с точкой  $\Pi_T$ . Длина этого участка  $L_{IV}$  имеет постоянное значение, например 300–800 м. Эта величина принимается заранее из условия обеспечения точного приведения БПЛА на устройство посадки. Здесь компенсируются погрешности реализации расчетной траектории сближения и происходит снижение скорости БПЛА до величины, необходимой для посадки.

Если принять  $T_3$  — время маневра возвращения БПЛА в точку  $A_3$ , то

$$A_3 = \Pi_0 + \int_0^{T_3} V_{\Pi}(t) dt, \quad (3)$$

где  $\Pi_0$  — место нахождения носителя с посадочным устройством в момент  $t = 0$  — момент принятия решения о возврате БПЛА;  $V_{\Pi}(t)$  — скорость носителя с посадочным устройством, соответственно, ее координатные составляющие  $V_{\Pi X}(t), V_{\Pi Y}(t), V_{\Pi Z}(t)$ .

Координаты конечной точки  $\Pi_T$ , в которой происходит сцепление БПЛА с носителем:

$$\Pi_T = A_3 + L_{IV} \arg(\Pi_T). \quad (4)$$

Знание координат точки  $A_3$  позволит определить координаты центра  $C_2$  циркуляции на третьем участке аналогично формулам (2).

Трудность решения уравнений (3), (4) в том, что величина  $T_3$  не определена. По этой причине предлагается воспользоваться итеративной процедурой уточнения значения  $T_3$ . В качестве первого приближения принимается, например:

$$T_3(i=1) = |\Pi_0 - A_0| / (V_A \pm V_{II}) + \pi R / V_A. \quad (5)$$

Ошибка первого приближения  $\Delta T_1$  не превосходит величину

$$\Delta T_3 = \pm \pi R / V_A.$$

Перебирая значения  $T_{3i}(i)$  в этом диапазоне методом, например, половинного деления, добиваемся допустимо малого значения  $\varepsilon$  невязки координат  $A_{2II}(T_{3i})$  на участке  $L_{II}$  и  $A_{2III}(T_{3i})$  на траектории  $L_{III}$ , т. е.

$$T_3 = T_{3i} \text{ при } |A_{2II}(T_{3i}) - A_{2III}(T_{3i})| < \varepsilon. \quad (6)$$

После определения значения  $T_3$  общая длина траектории сближения  $L$  определяется суммой длин четырех участков  $L = L_I + L_{II} + L_{III} + L_{IV}$ .

Расчет протяженности минимальной траектории сближения  $L$  в реальном масштабе времени позволяет контролировать возможность возвращения БПЛА на посадочное устройство судна-носителя. Если оставшийся запас горючего на борту уменьшился до величины  $M_{кр}$ , необходимой для возвращения на носитель, то следует начинать маневр возвращения БПЛА.  $M_{кр} = Lm_L$ , где  $m_L$  — расход топлива на единицу пути.

Отметим, что, если  $L \gg L_I + L_{III} + L_{IV}$ , то точный расчет величины  $L$  можно заменить приближенным:

$$L = |\Pi_0 - A_0| / (1 \pm V_{II} / V_A) + 2\pi R, \quad (7)$$

где  $V_{II} / V_A$  — отношение средних скоростей; знак «+» используется в случае, когда направления движения носителя и БПЛА в момент времени  $t = 0$  соответствуют удалению их друг от друга, а «-», когда происходит их сближение.

Для оценки погрешности приближенной формулы (7) целесообразно провести более точный расчет по изложенной выше методике.

Координаты характерных точек траектории  $C_1, C_2, A_1, A_2, A_3$ , найденные в плоскости (1), пересчитываются в исходную систему координат.

Приведенные соотношения справедливы для идеальной системы управления БПЛА. Определить реальную траекторию сближения БПЛА с судном можно методом численного моделирования движения БПЛА по маршруту «идеальной» траектории, когда БПЛА с системой управления принимаются идеальным безынерционным звеном.

Для этого задаются начальные условия (положение БПЛА  $A_0$  и носителя  $\Pi_0$ , их скорости  $V_A$

и  $V_{II}$ ) в координатах  $x, y, z$  и определяется допустимое значение радиуса  $R$  и угловой скорости  $\omega$  поворота БПЛА. Таким образом определяются характерные параметры траектории  $C_1, C_2, A_1, A_2, A_3, A_4$  и  $\varphi_{A2}, \Pi_T$ , а также  $T_3$  и  $L$ . Для каждого участка траектории I, II и III формируется числовой массив  $A_i(x, y, z, t)$ . При первом повороте параметры расчетной траектории  $A_i(x_1, y_1, z_1, t)$  последовательно с выбранным шагом определяются следующими соотношениями:

$$t(i) = i\Delta t; \quad \Delta\varphi = \Delta t\omega; \quad \varphi(i) = \varphi(i-1) + \Delta\varphi;$$

$$x_I(i) = X_{C1} + R \cos \varphi(i); \quad z_I(i) = Z_{C1} + R \sin \varphi(i). \quad (8)$$

Если угол снижения в вертикальной плоскости  $\vartheta_{тр}$  постоянный, он определяется отношением разности высот БПЛА и носителя к горизонтальной дальности между БПЛА и носителем для всех участков траектории:

$$y_I(i) = y_I(i-1) + \Delta y, \text{ где}$$

$$\Delta y = \operatorname{tg} \vartheta_{тр} \sqrt{(x_I(i) - x_I(i-1))^2 + (z_I(i) - z_I(i-1))^2}. \quad (9)$$

Номер  $i_1$  координат последней точки на этом участке определяется выполнением условия

$$\text{если } (|x_I(i) - X_{A1}| + |z_I(i) - Z_{A1}|) / 2 \leq \varepsilon,$$

$$\text{то } i_1 = i. \quad (10)$$

На втором (прямолинейном) участке  $A_i(x_2, z_2)$  формируется соотношениями

$$t(i) = t(i_1) + i\Delta t; \quad x_{II}(i) = X_{A1} + iV_A \Delta t \sin \varphi_{A2};$$

$$z_{II}(i) = Z_{A1} + iV_A \Delta t \cos \varphi_{A2} \quad (11)$$

до выполнения условия, аналогичного (10):

$$\text{если } (|x_{II}(i) - X_{A2}| + |z_{II}(i) - Z_{A2}|) / 2 \leq \varepsilon,$$

$$\text{то } i_2 = i.$$

Для третьего участка  $A_i(x_3, z_3)$  размерностью  $i_3$  формируется аналогично соотношениям (7) и (8). Поскольку на четвертом участке происходит самонаведение на заданное место устройства зацепления, программное движение по прямолинейной траектории не представляет практического интереса. По этой причине целесообразно в настоящем разделе ограничиться рассмотрением третьего участка. Таким образом, формируется вектор расчетной траектории сближения

$$A_{тр} = [A_I(1:i_1)A_{II}(1:i_2)A_{III}(1:i_3)]. \quad (12)$$

Погрешность реализации ее третьего участка будет определять начальное рассогласование для

системы самонаведения БПЛА на устройство зацепления на судне.

**Особенности движения БПЛА по расчетной траектории**

Упрощенная структурная схема системы управления БПЛА по углу в горизонтальной и вертикальной плоскостях [2] представлена на рис. 2.

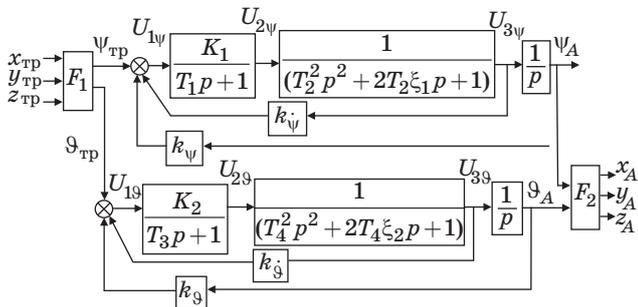
Ошибка отклонения (особенно по координатам  $X$  и  $Z$ ) достигает нескольких десятков метров, что существенно затрудняет самонаведение, а в ряде случаев недопустимо для приведения БПЛА в зону самонаведения на посадочное устройство.

Для улучшения качества программного движения, каким является возвращение БПЛА к движущемуся носителю, целесообразно ввести упреждение, т. е. вместо траекторных углов  $\psi_{\text{тp}i}$ ,  $\vartheta_{\text{тp}i}$ , определяемых массивом (12), вычислять их как направление на траекторную точку, удаленную вперед по траектории на  $n$  шагов:

$$\left\{ \begin{aligned} \psi_{\text{тp}i} &= \text{arctg} \left( \frac{x_{\text{тp}}(i-n) - x_{\text{тp}}(i)}{z_{\text{тp}}(i-n) - z_{\text{тp}}(i)} \right); \\ \vartheta_{\text{тp}i} &= \text{arctg} \times \\ &\times \left( \frac{y_{\text{тp}}(i-n) - y_{\text{тp}}(i)}{\sqrt{(z_{\text{тp}}(i-n) - z_{\text{тp}}(i))^2 + (x_{\text{тp}}(i-n) - x_{\text{тp}}(i))^2}} \right). \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Подбирая оптимальное значение упреждения  $n$ , можно существенно снизить ошибку приведения БПЛА в точку  $A_3$ .

Введение упреждения в программный сигнал управления позволило скомпенсировать влияние



■ **Рис. 2.** Структурная схема системы управления БПЛА:  $T_1 - T_4$  — постоянные времени рулевого тракта и летательного аппарата;  $\xi_1$  и  $\xi_2$  — коэффициенты затухания;  $K_1, K_2, k_\psi, k_\vartheta, k_{\dot{\psi}}, k_{\dot{\vartheta}}$  — коэффициенты усиления контура управления по углам  $\psi_A, \vartheta_A$  и скорости их изменения  $\dot{\psi}$  и  $\dot{\vartheta}$ ;  $F_1$  — преобразователь траекторных координат в углы  $\psi_{\text{тp}}$  и  $\vartheta_{\text{тp}}$ ;  $F_2$  — преобразователь траекторных углов БПЛА  $\psi_A$  и  $\vartheta_A$  в координаты  $(x_A, y_A, z_A)$  местоположения БПЛА

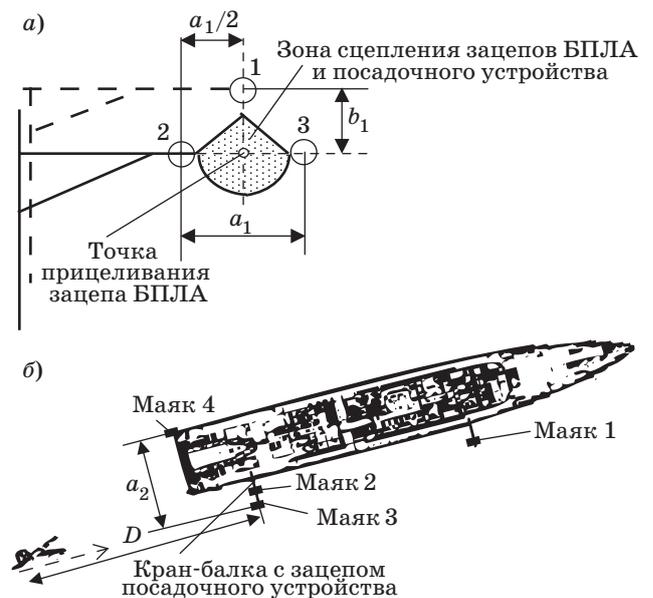
инерционности летательного аппарата и обеспечить расчетную траекторию сближения.

Отметим, что для определения начальных рассогласований участка самонаведения необходимо оценить возможные отклонения от программной траектории при случайных возмущениях атмосферы, а также влияние ошибок навигационной системы БПЛА и судна (носителя). Особого внимания заслуживает участок в окрестностях точки  $A_3$ , где заканчивается равномерное снижение БПЛА и движение на малой высоте, соответствующей высоте зацепления посадочного устройства.

**Особенности управления посадкой БПЛА с бортовым телевизионным каналом на движущееся судно**

Рассмотрим участок траектории  $A_3 - A_{\text{п}}$ . Для автономной ориентации БПЛА относительно посадочного устройства необходимо минимум три маяка. Пример расположения маяков в вертикальной плоскости зоны зацепления БПЛА и посадочного устройства показан на рис. 3, а. Характерными конструктивными размерами здесь являются расстояние  $a_1$  в горизонтальной плоскости между маяками 2 и 3, а также расстояние между маяками 1 и 2, например  $a_1/2$ . В вертикальной плоскости расстояние между маяками 1 и 2 или 3 обозначено  $b_1$ . Маяк 1 удален от кранбалки посадочного устройства на расстояние в пределах корпуса судна.

Дополнительный маяк 4, расположенный на расстоянии  $a_2$  относительно маяка 3, необходим



■ **Рис. 3.** Расположение маяков:  $a$  — в вертикальной плоскости;  $b$  — в горизонтальной плоскости

для ориентации БПЛА на дистанциях, при которых угловое разрешение маяков 2 и 3 неудовлетворительно для выработки сигналов управления полетом БПЛА (рис. 3, б).

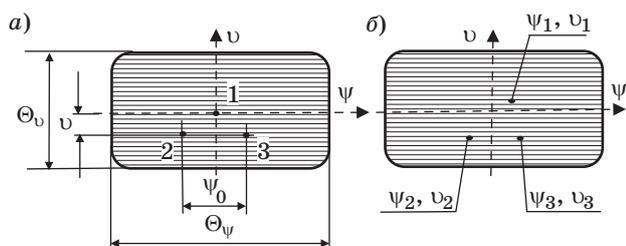
Траектория последнего участка соответствует самонаведению в центр зоны сцепления зацепов БПЛА и посадочного устройства на малой высоте, обеспечивая движение на постоянной высоте или плавное снижение по высоте до уровня, например, расположения маяка 1 над поверхностью воды.

Идеальной траекторией сближения БПЛА будем считать горизонтальную прямую линию, проходящую через «дальний» (первый) маяк и параллельную курсу движения судна. При идеальной траектории зацеп БПЛА попадает в центр зоны сцепления посадочного устройства (см. рис. 3, а). В этом случае текущее значение углового положения маяков в горизонтальной плоскости относительно БПЛА соответственно:

$$\psi_{01}(t) = 0; \psi_{02}(t) = -\psi_0 / 2; \psi_{03}(t) = +\psi_0 / 2, \quad (14)$$

где  $\psi_0 = n_{\psi 0} \psi_n$  — угловой размер между вторым и третьим маяками в горизонтальной плоскости, град (рис. 4, а);  $n_{\psi 0}$  — число элементов разрешения приемного устройства между центрами яркости второго и третьего маяка;  $\psi_n$  — угловой размер одного элемента разрешения.

При отклонении БПЛА от идеальной траектории изображения маяков на приемном устройстве телевизионного координатора смещаются относительно их изображений при идеальной траектории. Пример смещенного положения ( $\psi_i, \upsilon_i$ ) отображений маяков 1, 2 и 3 на приемном устройстве бортового телевизионного канала (ТВК) показан на рис. 4, б. Оценка ошибки углового рассогласования  $\Delta\psi$  и  $\Delta\upsilon$  в горизонтальной и вертикальной плоскостях определяется разностью истинного положения центра пятна засветки каждого маяка и его нулевого положения, соответствующего положению БПЛА на идеальной траектории. При наличии в поле зрения ТВК трех



■ Рис. 4. Отображение маяков 1, 2 и 3 на приемном устройстве БПЛА: а — при отсутствии рассогласования линии визирования маяков с направлением полета; б — смещенное положение отображений маяков

маяков ошибка углового рассогласования определяется усредненным значением:

$$\Delta\psi(t) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\psi_{0i}(t) - \psi_i(t));$$

$$\Delta\upsilon(t) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\upsilon_{0i}(t) - \upsilon_i(t)). \quad (15)$$

В каждый момент времени с частотой кадровой развертки ТВК измеряются относительно центра кадра величины углового положения маяков  $\psi_i, \upsilon_i$ . Важно отметить, что величины ( $\psi_i, \upsilon_i, \psi_{0i}, \upsilon_{0i}$ ) меняются в зависимости от времени, так как при сближении БПЛА с посадочным устройством меняется дистанция.

Конструктивные параметры  $a_1$  и  $b_1$  расположения маяков постоянны. Если объектив ТВК имеет неизменное поле зрения, то значения  $\psi_{0i}, \upsilon_{0i}$  зависят только от дистанции  $D$ .

Текущее значение «промаха»  $\Delta Z$  и  $\Delta Y$ , как отклонение точки пересечения линии направления вектора скорости БПЛА с вертикальной плоскостью маяков 2 и 3 от центра зоны сцепления посадочного устройства (точка прицеливания БПЛА обозначена на рис. 3, а), определяется соотношениями  $\Delta Z = \Delta\psi D$  и  $\Delta Y = \Delta\upsilon D$ .

Для определения отклонения линии визирования посадочного устройства и, соответственно, отклонения направления полета БПЛА от идеальной траектории необходимо знать дистанцию от БПЛА до посадочного устройства в каждый момент времени измерения.

Наиболее заманчивым способом измерения дистанции, который не требует установки дополнительных конструктивных элементов на БПЛА и носителе посадочного устройства, является способ, использующий простые геометрические соотношения, точное знание расположения маяков относительно друг друга и возможность наблюдения и точного измерения их относительного углового расстояния.

Кроме пассивных методов измерения дистанции до маяков и их углового положения существует множество активных и полуактивных методов локации, позволяющих БПЛА с необходимой точностью измерять дистанцию до маяков. Например, для этой цели используется бортовой лазерный локатор с полупроводниковым излучателем.

### Особенности приведения БПЛА на посадочное устройство при качке судна

При качке судна происходит колебательное смещение маяков  $\Delta Z_k$  и  $\Delta Y_k$  в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На приемном устройстве ТВК наблюдается смещение изображения

маяков (рис. 5, а) с периодом качки  $T_k$  на величину  $\psi_k = \Delta Z_k / D$  и  $\upsilon_k = \Delta Y_k / D$  в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно.

Стабилизация в вертикальной и горизонтальной плоскостях посадочного устройства и маяков осуществляется при помощи двух электромеханических приводов. С помощью одного электромеханического привода поворота кран-балки в вертикальной плоскости можно компенсировать вертикальное смещение одного маяка точно, а другого маяка, расположенного на этой кран-балке, с некоторой ошибкой.

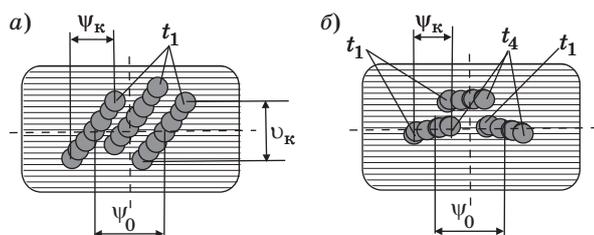
При отсутствии качки кран-балка находится в горизонтальном положении. При наличии угла крена  $\gamma$  кран-балка смещается и поворачивается. Привод стабилизации поворачивает кран-балку на угол  $\gamma_{\Pi}$ , возвращая маяк в прежнюю горизонтальную плоскость. При этом компенсируется смещение в вертикальной плоскости, но остается смещение в горизонтальной плоскости  $\Delta Z_k$ , величина которого определяется конструктивными размерами расположения кран-балки на судне.

Отметим, что при смещении одного маяка,  $\Delta Y_k = 0$ , смещение  $\Delta Y_k \neq 0$  для другого маяка, находящегося на кран-балке на удалении  $a_1$  от первого:

$$\Delta Y_k = a_1 L_1 (\cos \gamma_1 - \cos(\gamma_1 + \gamma)) / L_2. \quad (16)$$

Относительно нестабилизированной кран-балки величина  $\Delta Y_k$  снижается в 3–5 раз. Для двух маяков целесообразно минимизировать величину  $\Delta Y_k$  в середине между ними, т. е. в точке прицеливания. Смещение изображения маяков на приемном устройстве ТВК для этого случая (стабилизация вертикального смещения маяка 1 и середины между маяками 2 и 3) показано на рис. 5, б. Здесь обозначены отображения маяков 1, 2 и 3 в одинаковые моменты времени  $t_1$  и  $t_4$ .

Уменьшить влияние качки на точность приведения БПЛА в точку прицеливания можно, прогнозируя величину смещения посадочного устройства в момент подлета к нему БПЛА.



■ **Рис. 5.** Изображения маяков на приемном устройстве ТВК при качке судна: а — без стабилизации положения маяков; б — со стабилизацией в вертикальной плоскости среднего маяка

Угловые колебания  $\Delta\psi(t)$  изображения маяка на приемном устройстве ТВК соответствуют колебаниям посадочного устройства  $\Delta Z(t) = \Delta\psi(t) \times D(t)$  с периодом бортовой качки судна  $T_{кч}$ .

Если принять скорость сближения  $V_c = V_A - V_{\Pi}$  БПЛА и посадочного устройства постоянной, то в каждый момент времени  $t$  с известной фазой колебаний можно прогнозировать величину смещения точки прицеливания  $\Delta Z_{(t)}$  в момент  $t_{(t)}$  стыковки БПЛА с посадочным устройством:

$$\Delta Z_{(t)} = \Delta Z_{кч} \cdot \sin((t_{(t)} - t_{(0)})2\pi / T_{кч} - \varphi_{(0)}), \quad (17)$$

где  $\Delta Z_{кч}$  — амплитуда колебаний точки прицеливания;  $t_{(0)}$  — момент измерения текущей фазы  $\varphi_{(0)}$  колебаний;  $t_{(t)} - t_{(0)} = D / V_c$  — прогнозируемое время от момента измерения  $\varphi_{(0)}$  до стыковки БПЛА с посадочным устройством.

Прогнозируемое в момент времени  $t$  угловое смещение  $\Delta\psi_{\Pi}(t)$  точки прицеливания в горизонтальной плоскости в соответствии с (17) определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta\psi_{\Pi}(t) &= \Delta Z_{(t)} / D = \\ &= (\Delta\psi_{кч} / D(t)) \cdot \sin((t_{(t)} - t)2\pi / T_{кч} - \varphi_{(0)}), \quad (18) \end{aligned}$$

где  $\Delta\psi_{кч}$  — амплитуда угловых колебаний изображения маяка.

Поправка  $\Delta\psi_{\Pi}(t)$  вычисляется по формуле (18) и суммируется вместе с сигналом координатора.

Величина промаха  $\Delta Z$  повышается по мере увеличения инерционности летательного аппарата и уменьшения периода качки.

Использование прогноза величины промаха и введение компенсирующего сигнала с измерением фазы колебаний  $\varphi_{(0)}$  снижает величину  $\Delta Z$  теоретически до 0, а практически до единиц миллиметров. Поэтому целесообразно исследовать влияние погрешности измерения  $\varphi_{(t)}$  на величину промаха.

Зависимость максимальной величины промаха  $\Delta Z$  от периода колебаний качки судна при погрешности измерения фазы находится в пределах  $\Delta\varphi_{(t)} = \pm 0,05$  рад. Очевидно, максимальные погрешности уменьшились почти на порядок. Кроме этого зависимость  $\sigma_Z$  от периода качки имеет сильные колебания от 0,16 м до величины менее 0,01 м. Причина периодических колебаний величины  $\Delta Z$  в том, что в момент  $t_{(t)}$ , при котором БПЛА достигает посадочного устройства, приходится на различные фазы колебаний  $\Delta Z_{(t)}$ .

На крайних (близких к амплитуде) точках колебаний погрешность определения фазы слабо сказывается на величине  $\Delta Z$ . В случае, когда фаза колебаний  $\Delta Z_{(t)}$  близка к нулю, ее скорость изменения максимальна и погрешность  $\Delta Z_{\max}$  прогноза промаха  $\Delta Z_{(t)}$  максимальная.

Фаза колебаний качки является случайной величиной, поэтому  $\varphi_{(t)}$  также может принимать любые значения в диапазоне  $2\pi$  для каждой гармонике колебаний. Отметим, что амплитуда и период качки на интервале времени сближения БПЛА с судном можно принять постоянными, измеряемыми навигационными приборами судна.

### Заключение

Результаты исследования задач, которые решает информационно-управляющая система БПЛА

и судна [2] для обеспечения посадки БПЛА на движущееся судно в условиях качки, продемонстрировали возможность и технические пути обеспечения посадки БПЛА на движущееся судно.

Теоретические оценки и результаты моделирования показывают, что предложенные варианты управления позволяют обеспечить в условиях качки судна до 4–5 баллов приведение БПЛА в точку сцепления с посадочным устройством, с ошибкой не более 0,1 м при погрешности измерения фазы колебаний качки до  $\approx 10$  угл. град и амплитуды до  $\approx 10$  %.

### Литература

1. Подоплёкин Ю. Ф., Шаров С. Н. Системный анализ аппаратуры системы управления беспилотного летательного аппарата судового базирования: сб. ст. НТО судостроителей. — СПб.: Остров, 2008. — С. 106–117.
2. Проблемы посадки беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно и технические пути их решения: сб. ст. / Под ред. С. Н. Шарова / Балт. гос. техн. ун-т; ОАО «Концерн «Гранит-Электрон». — СПб., 2010. — 104 с.
3. Шаров С. Н. Информационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов. — СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2007. — 256 с.
4. Дремлюга Г. П., Есин С. А., Иванов Ю. Л., Лященко В. А. Беспилотные летательные аппараты: Состояние и тенденции развития / Под ред. д. т. н., проф. Ю. Л. Иванова. — М.: ЛА «Варяг», 2004. — 176 с.

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Национальная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, в том числе добавлять публикации, которых нет в базе данных НЭБ, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.