

УДК 519.714

ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ «ВОЗДУХ-ПОВЕРХНОСТЬ» СПЕЦИАЛЬНОГО КЛАССА

И.В. Попова*АО «ГИРООПТИКА»*

Россия, 194044, Санкт-Петербург, Чугунная ул., 14

E-mail: i-popova@bk.ru**А.В. Земсков***АО «ГИРООПТИКА»*

Россия, 194044, Санкт-Петербург, Чугунная ул., 14

E-mail: aleksei.zemskov@yandex.ru**И.Л. Суров***АО «ГИРООПТИКА»*

Россия, 194044, Санкт-Петербург, Чугунная ул., 14

E-mail: ilsurov@gmail.com**И.М. Пчелкин***Михайловская военная артиллерийская академия*

Россия, 195009, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22

E-mail: pchel64rus@mail.ru

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, управление, дальность планирования, адаптивная бортовая система управления, аэродинамические характеристики.

Аннотация: Исследуется влияние ряда факторных признаков на максимальную дальность планирования планирующих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) «воздух-поверхность» специального класса. Приводится пример построения оценки для максимальной достижимой дальности планирующего БПЛА специального класса в виде четырехфакторной линейной регрессии.

1. Введение

При управлении планирующими БПЛА «воздух-поверхность» специального назначения важнейшей задачей является обеспечение существенно большей дальности полета по сравнению с «баллистической» траекторией. При этом применение адаптации параметров законов управления по скоростному напору позволяет эффективно решать задачи управления в широком диапазоне начальных условий при их различных компоновочных схемах [1]. Определенные практические обстоятельства привели к необходимости выполнения комплекса исследований по применению планирующих БПЛА «воздух-поверхность» специального класса с носителями весьма разнообразных типов, исходя из режимов полета, скоростей и высот сброса. Результаты указанных исследо-

ваний, полученные в АО «ГИРООПТИКА» (г. Санкт-Петербург), излагаются ниже.

2. Алгоритмы наведения, управления и стабилизации

При формировании уставок наведения в картинной плоскости используется метод пропорционального сближения с угловой скоростью $\bar{\Omega}$ линии визирования в качестве параметра [2]. Формирование законов управления в БПЛА с микромеханической бесплатформенной инерциальной навигационной системой (БИНС) [1] производится в земной системе координат $OX_g Y_g Z_g$. В ней записываются координаты $X_{g\ddot{o}}$, $Y_{g\ddot{o}}$, $Z_{g\ddot{o}}$ неподвижной точки интереса и координаты X_g , Y_g , Z_g БПЛА, а также составляющие земной скорости БПЛА V_{Xg} , V_{Yg} , V_{Zg} . Проекция вектора дальности \bar{D} на оси $OX_g Y_g Z_g$ и его абсолютное значение определяются по формулам

$$D_{Xg} = X_{g\ddot{o}} - X_g, D_{Yg} = Y_{g\ddot{o}} - Y_g, D_{Zg} = Z_{g\ddot{o}} - Z_g, D = \sqrt{D_{Xg}^2 + D_{Yg}^2 + D_{Zg}^2}.$$

Уравнение плоскости, проходящей через векторы \bar{D} и \bar{V} , имеет вид:

$$(D_{Yg}V_{Zg} - D_{Zg}V_{Yg})x + (D_{Zg}V_{Xg} - D_{Xg}V_{Zg})y + (D_{Xg}V_{Yg} - D_{Yg}V_{Xg})z = 0.$$

Вектор $\bar{\Omega}$ совпадает с нормалью к этой плоскости. Направляющие косинусы этой нормали определяются по формулам

$$\cos\Omega_{Xg} = \frac{D_{Yg}V_{Zg} - D_{Zg}V_{Yg}}{\sqrt{M}}, \cos\Omega_{Yg} = \frac{D_{Zg}V_{Xg} - D_{Xg}V_{Zg}}{\sqrt{M}}, \cos\Omega_{Zg} = \frac{D_{Xg}V_{Yg} - D_{Yg}V_{Xg}}{\sqrt{M}},$$

где

$$M = (D_{Yg}V_{Zg} - D_{Zg}V_{Yg})^2 + (D_{Zg}V_{Xg} - D_{Xg}V_{Zg})^2 + (D_{Xg}V_{Yg} - D_{Yg}V_{Xg})^2.$$

Угол γ_{DV} между векторами \bar{D} и \bar{V} с учетом их направляющих косинусов определяется соотношениями

$$\cos\alpha_X = D_{Xg}/D, \cos\alpha_Y = D_{Yg}/D, \cos\alpha_Z = D_{Zg}/D,$$

$$\cos\beta_X = V_{Xg}/V, \cos\beta_Y = V_{Yg}/V, \cos\beta_Z = V_{Zg}/V,$$

$$V = \sqrt{V_{Xg}^2 + V_{Yg}^2 + V_{Zg}^2},$$

$$d_x = \cos\alpha_Y \cos\beta_Z - \cos\alpha_Z \cos\beta_Y,$$

$$d_y = \cos\alpha_Z \cos\beta_X - \cos\alpha_X \cos\beta_Z,$$

$$d_z = \cos\alpha_X \cos\beta_Y - \cos\alpha_Y \cos\beta_X,$$

$$\sin\gamma_{DV} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} = \sqrt{M}/(DV).$$

$$\Omega = -V \sin\gamma_{DV} / D = -\sqrt{M} / D^2.$$

Проекция вектора $\bar{\Omega}$ на оси $OX_g Y_g Z_g$ с учетом приведенных формул равны

$$\Omega_{Xg} = \Omega \cos\Omega_{Xg} = (D_{Zg}V_{Yg} - D_{Yg}V_{Zg}) / D^2,$$

$$\Omega_{Yg} = \Omega \cos\Omega_{Yg} = (D_{Xg}V_{Zg} - D_{Zg}V_{Xg}) / D^2,$$

$$\Omega_{Zg} = \Omega \cos\Omega_{Zg} = (D_{Yg}V_{Xg} - D_{Xg}V_{Yg}) / D^2.$$

В качестве параметров, используемых при формировании управляющих сигналов наведения по методу пропорционального сближения, приняты проекции вектора $\bar{\Omega}$ на связанные оси O_y и O_z

$$\begin{aligned}\Omega_y &= \Omega_{Xg} (-\cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma) + \Omega_{Yg} \cos \vartheta \cos \gamma + \\ &+ \Omega_{Zg} (\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma), \\ \Omega_z &= \Omega_{Xg} (\cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma + \sin \psi \cos \gamma) + \Omega_{Yg} (-\cos \vartheta \sin \gamma) + \\ &+ \Omega_{Zg} (\cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma).\end{aligned}$$

Потребное нормальное ускорение по вертикали формируется по закону

$$a_{y\ddot{i}} = k_y \Omega_z V + g,$$

где: k_y – коэффициент закона наведения в вертикальной плоскости; $a_{y\ddot{i}}$ – потребное нормальное ускорение вдоль оси y (м/с^2); Ω_z – проекция угловой скорости линии визирования на ось z (рад/с); V – линейная скорость объекта (м/с); g – ускорение свободного падения (м/с^2).

Наведение в горизонтальной плоскости осуществляется по закону

$$a_{z\ddot{i}} = k_z \Omega_y V,$$

где: k_z – коэффициент закона наведения в горизонтальной плоскости; $a_{z\ddot{i}}$ – потребное нормальное ускорение вдоль оси z (м/с^2); Ω_y – проекция угловой скорости линии визирования на ось y (рад/с); V – линейная скорость объекта (м/с).

Закон управления в канале крена имеет следующий вид:

$$\Delta \delta_y = k_1 \Delta \omega_x + k_2 \Delta \gamma + k_3 \int \Delta \gamma dt,$$

где: $\Delta \delta_y$ – отклонение элеронов; k_1, k_2, k_3 – передаточные числа по соответствующим вариациям параметров, являющиеся функциями скоростного напора; $\Delta \omega_x$ – вариация угловой скорости крена; $\Delta \gamma$ – вариация угла крена.

Типовые законы управления в горизонтальном канале (канале рыскания) и вертикальном канале (канале тангажа) имеет следующую форму:

$$\Delta \delta_i = k_4 (a_z - a_{z\ddot{i}}) + k_5 \int (a_z - a_{z\ddot{i}}) dt + k_6 \Delta \omega_y + k_7 \Delta \psi,$$

$$\Delta \delta_a = k_8 (a_y - a_{y\ddot{i}}) + k_9 \int (a_y - a_{y\ddot{i}}) dt + k_{10} \Delta \omega_z + k_{11} \Delta \vartheta,$$

где: $\Delta \delta_i, \Delta \delta_a$ – отклонения рулей направления и высоты; $k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}, k_{11}$ – передаточные числа по соответствующим вариациям параметров, являющиеся функциями скоростного напора; a_z, a_y – текущие значения бокового и нормального ускорений; $\Delta \omega_y, \Delta \omega_z$ – вариации угловых скоростей рыскания и тангажа; $\Delta \psi, \Delta \vartheta$ – вариации углов рыскания и тангажа.

На потребные ускорения применительно к рассматриваемому образцу планирующего БПЛА специального класса вводятся следующие ограничения:

$$|a_{y\ddot{i}}| < (0,9 c_{y\max} q_c S) / m, \quad |a_{z\ddot{i}}| < (0,9 c_{z\max} q_c S) / m,$$

где: $c_{y\max}, c_{z\max}$ – максимальные значения аэродинамических коэффициентов сил по соответствующим осям; q_c – скоростной напор ($\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$); S – площадь миделя (м^2); m – масса БПЛА (кг).

Настройка коэффициентов системы управления по скоростному напору происходит на этапе моделирования с учетом прогнозируемых аэродинамических характеристик (АДХ) БПЛА, что позволяет обеспечить приемлемое качество управления в широком диапазоне высот и скоростей его полета.

3. Оценка дальности планирования планирующего БПЛА

При построении зон разрешенного сброса для планирующих БПЛА важнейшей задачей является оценка достижимости по дальности «по прямой». Значительные объемы теоретико-экспериментальных исследований, выполненных в АО «ГИРООПТИКА» применительно к указанной проблематике, показали валидность использования общей модели пространственного движения планирующего БПЛА с адаптивной бортовой системой управления (АБСУ) с уточнением исходных данных по АДХ и массово-габаритным характеристикам для конкретного типа планирующего БПЛА. При этом конструктивно-компоновочный облик БПЛА (схема с увеличенным аэродинамическим оперением или схема с крыльевым модулем) не принципиален для рассматриваемых при исследовании вопросов.

Несмотря на многообразие факторов, в результате моделирования было выявлено существенное влияние на дальность планирования «по прямой» следующих факторов:

- продольной составляющей скорости сброса (V_x);
- вертикальной составляющей скорости сброса (V_y);
- угла тангажа;
- высоты сброса (Y).

Как показали теоретико-экспериментальные исследования, увеличение выборки от сотен к тысяче опытных точек не приводит к существенному изменению прогноза, общее выражение которого имеет вид линейной регрессии:

$$(1) \quad D_{\max} = b_0 + b_1 V_x + b_2 V_y + b_3 \vartheta + b_4 Y.$$

Усложнение формы прогноза (1) за счет возможной нелинейной связи части факторных признаков между собой не приводит к какому-либо выигрышу в плане точности. Кроме того, на практике значение D_{\max} «обрезается» на 5-10 % из-за необходимости учета критической ситуации постоянного встречного ветра, поскольку стандартная модель атмосферы ISA из Simulink, применяемая в модели пространственного движения планирующего БПЛА, задает случайные погодные возмущения не столь жесткого характера.

VAR1NEW M= 0,85 H= 10								
bet	Cxa	Cya	K	Cza	mxa	mya	mza	
0	0,4359	0,48959	1,12318	-0,0001965	-0,0000007	-0,0000368	-0,01485	
-5	0,49544	0,49494	0,99901	0,898569	0,00280789	0,0640702	-0,01589	
-10	0,68608	0,50685	0,73876	1,77854	0,00674941	0,127076	-0,0187	
-15	1,02626	0,53295	0,51931	2,55876	0,0121105	0,144231	-0,02668	
VAR1NEW M= 0,5 H= 4								
bet	Cxa	Cya	K	Cza	mxa	mya	mza	
0	0,24992	0,45716	1,82927	-0,0000891	-0,0000016	0,0000345	-0,01376	
-5	0,29288	0,46392	1,58402	0,809933	0,00305446	0,0456331	-0,01582	
-10	0,43794	0,47304	1,08015	1,61807	0,00670253	0,0890515	-0,01887	
-15	0,72043	0,47392	0,65782	2,37948	0,0108409	0,112872	-0,02131	

Рис. 1. АДХ планирующего БПЛА/

Например, для планирующего БПЛА специального класса, часть АДХ которого приводится на рис. 1 (вариант VAR1NEW соответствует нулевому положению рулевых органов), прогноз (1) конкретизируется следующим образом:

$$(2) \quad D_{\max} = -14,22 + 0,148 \cdot V_x - 0,121 \cdot V_y + 0,335 \cdot \vartheta + 4,721 \cdot Y.$$

В выражении (2) размерность дальности и высоты сброса – км. Размерность про-

дольной и вертикальной составляющих скорости сброса – м/с. Размерность угла тангажа – град. Соответственно, коэффициенты модели имеют размерности: b_0 , км; b_1 , км/(м/с); b_2 , км/(м/с); b_3 , км/град; b_4 , безразмерный. При возможных вариациях параметров сброса $V_x = 100 \dots 300$ м/с, $V_y = -30 \dots 30$ м/с, $\vartheta = -20 \dots 20^\circ$, $Y = 5 \dots 13$ км прогноз (2) дает весьма точные оценки для достижимой максимальной дальности при конкретном сочетании факторных признаков.

В качестве примера на рис. 2 приводится иллюстрация валидности прогноза в сравнении с опытной выборкой из 10 точек (в данном случае большее количество точек не используется, исходя из соображений наглядности).

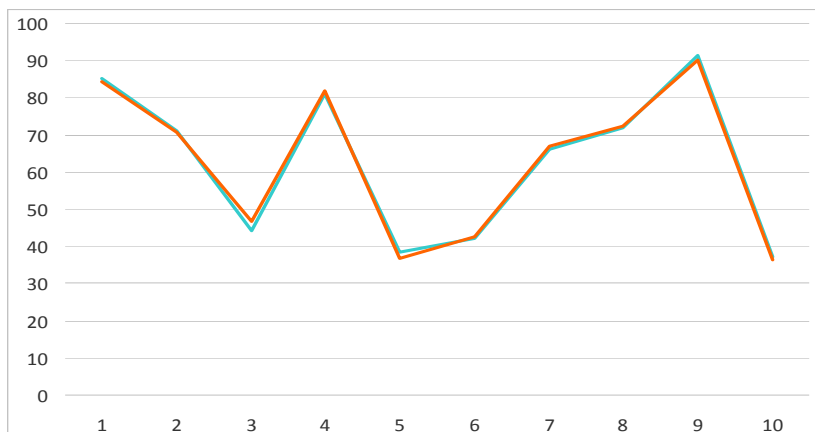


Рис. 2. Опытные и прогнозные (расчетные) данные для достижимой максимальной дальности планирующего БПЛА специального класса (голубой цвет – опытные данные; коричневый цвет – прогноз; по оси ординат дальность, км)

В прогнозе максимальной дальности (2) для планирующего БПЛА специального класса наиболее значимыми факторами выступают продольная составляющая скорости сброса (частный коэффициент корреляции с дальностью $r_{V_x D} = 0,778$) и высота сброса ($r_{Y D} = 0,938$). Вертикальная составляющая скорости сброса ($r_{V_y D} = -0,099$) и угол тангажа ($r_{\vartheta D} = 0,089$) в данном случае существенного влияния не имеют. Как следствие, закономерен практический вывод о малой значимости специальных режимов сброса (пикирования и кабрирования) для планирующего БПЛА большой дальности указанного типа.

4. Заключение

Все описанные алгоритмы в последних АБСУ разработки АО «ГИРООПТИКА» реализованы на микроконтроллерах 1892ВМ10Я и 1892ВМ14Я (ОАО НПЦ «ЭЛВИС», г. Зеленоград) в составе БИНС и блока (платы) управления. Указанные микроконтроллеры обеспечивают решение полной навигационной задачи при комплексировании микромеханических БИНС и других источников навигационной информации, задачи построения путевой траектории, а также задачи адаптивного управления движением в реальном масштабе времени с тактовой частотой 100...200 Гц в зависимости от типа конкретного планирующего БПЛА.

Список литературы

1. Попова И.В., Земсков А.В., Лестев А.М., Пестова К.С. Алгоритмы управления планирующими беспилотными летательными аппаратами «воздух-поверхность» // Труды XII Всероссийское совещание по проблемам управления. Москва, 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 3681-3689.
2. Соловей Э.Я. Динамика систем наведения управляемых авиабомб [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Соловей Э.Я., Храпов А.В. – Электрон. текстовые данные. М.: Машиностроение, 2006. 326 с. Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/5159.html>. ЭБС «IPRbooks».