

$\frac{|\vec{d}|}{f} H_{t_{0+1}}$, где f – фокусное расстояние камеры, а его направление выражается через

угол рысканья дрона, который равен углу между вектором \vec{d} и вектором курса дрона относительно кадра I_t .

Таким образом, во всех проведенных вычислительных экспериментах виртуальный квадрокоптер вернулся в исходную точку, при этом погрешность оценки его траектории полета не превосходила одного-двух пикселей, что в пересчете в метрические единицы в худшем случае дает 2–4 м.

Л и т е р а т у р а

1. Бесспутниковая навигация БПЛА : науч.-техн. дайджест. – М-во обороны Рос. Федерации, 2012. – 22 с.
2. Тищенко, И. П. Разработка системы моделирования автономного полета беспилотного летательного аппарата / И. П. Тищенко, Д. Н. Степанов, В. П. Фраленко // Програм. продукты и системы. – 2012. – № 3 (12). – С. 3–21.
3. Степанов, Д. Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер / Д. Н. Степанов // Програм. продукты и системы. – 2014. – № 1 (105). – С. 150–157.

АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

К. В. Мороз, М. В. Зайченко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель В. В. Брель

Описан алгоритм предполетного планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата средствами бортовой системы управления с учетом изменения динамических характеристик летательного аппарата вследствие уменьшения запасов топлива и массы полезной нагрузки, а также параметров полета в точке сброса груза. Алгоритм отличается от аналогов повышенной точностью и более низкой вычислительной трудоемкостью расчета баллистико-навигационных задач.

Ключевые слова: БПЛА, баллистико-навигационное обеспечение, планирование траектории, траектория движения.

Использование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) вертолетного типа при проведении поисково-спасательных операций в условиях высоких широт и других трудно доступных территорий позволяет повысить эффективность поисковых работ. Трудности обеспечения планирования траектории движения БПЛА связаны в том числе с тем, что в существующих методах глобального (предполетного) и локального (в полете) планирования траектории движения БПЛА переменной массы используются приближенные значения численных методов математического моделирования динамических свойств летательного аппарата, которые не всегда дают необходимую точность и зависят от мощности бортовых вычислителей с точки зрения скорости вычислений в реальном времени. В ходе предполетной подготовки спасательной операции средствами бортовой системы управления БПЛА с встроенной упрощенной динамической моделью летательного аппарата, представленной в виде однородного обыкновенного дифференциального уравнения n -го порядка (системы n управлений первого порядка)

с кусочно-постоянными коэффициентами, осуществляется планирование траектории движения вертолета с учетом изменений в ходе полета запасов топлива и массы полезной нагрузки (вариант построения упрощенной математической модели БПЛА в виде систем дифференциальных уравнений в форме Коши, а также порядок приведения их и обыкновенных неоднородных дифференциальных уравнений к обыкновенным однородным дифференциальным уравнениям высших порядков).

По имеющейся приближенной математической модели вертолета, представленной в виде приведенного однородного обыкновенного дифференциального уравнения n -го порядка с кусочно-постоянными коэффициентами вида

$$a_{0,j} + a_{1,j} \frac{dy(t)}{dt} + a_{2,j} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \dots + a_{n-1,j} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \frac{d^n y(t)}{dt^n} = 0,$$

где n – порядок математической модели летательного аппарата, строят характеристические полиномы вида

$$a_{0,j} + a_{1,j}s + a_{2,j}s^2 + \dots + a_{n-1,j}s^{n-1} + s^n,$$

где $a_{i,j}$ – кусочно-постоянные коэффициенты; s – независимая переменная (параметр интегрального преобразования Лапласа).

Для частного случая простых корней характеристического полинома формируют следующую матрицу-строку:

$$\text{BASIS} \in R^{1 \times n} = (b_{i,j}) = [e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t}, \dots, e^{\lambda_n t}],$$

где $e^{\lambda_i t}$ – i -я базисная функция, соответствующая корню λ_i .

Для случая кратных корней полинома ($n \geq p$) матрицу строят в порядке следования корней и возрастания номера корневой модификации базисной функции.

Строят вспомогательную матрицу $C \in R^{n \times n} = (c_{i,j})$, в которой элементы первой строки $c_{1,i}$ есть элементы $b_{1,i}$ матрицы BASIS, а значения остальных элементов зависят от кратности корней характеристического полинома.

Подстановкой значения опорной точки маршрута находят ее начальную (опорную) модификацию.

По параметрам модели летательного аппарата в опорной точке маршрута, заданным n -дифференциальными операторами вида

$$\sum_{i=0}^{n-1} w_{k,i} \frac{d^i y(c_{\text{он}})}{dt^i} = Y_k, \quad k = \overline{1, n},$$

формируют n матриц-строк $POL - ICS^k \in R^{1 \times n} = (w_{1,i}^k)$ значений коэффициентов полиномов начальных условий, где элементы матриц вычисляют по формуле

$$w_{1,i+1}^k = w_{k,i}, \quad i = \overline{0, n-1}, \quad k = \overline{1, n},$$

где k – порядковый номер дифференциального оператора.

Находят матрицу коэффициентов разложения функции на простейшие дроби в форме Быстрова–Тетерина, в которой элементы первой строки $k_{i,1}$ есть элементы первого столбца $i, 1$ матрицы опорных начальных условий, а значения остальных элементов зависят от кратности корней характеристического полинома. Для случая простых корней ($m_i = 1$) элементы матрицы вычисляют по формуле

$$k_{i,j} = \lambda_j^{i-1} k_{1,j}, \quad i = \overline{2, n}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Тогда матрица принимает следующий вид:

$$KERN = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \cdots & k_{1,n} \\ \lambda_1 k_{1,1} & \lambda_2 k_{1,2} & \cdots & \lambda_n k_{1,n} \\ \lambda_1^2 k_{1,1} & \lambda_2^2 k_{1,2} & \cdots & \lambda_n^2 k_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{n-1} k_{1,1} & \lambda_2^{n-1} k_{1,2} & \cdots & \lambda_n^{n-1} k_{1,n} \end{bmatrix}.$$

Матрицу KERN записывают в память вычислительных средств бортовой системы управления летательного аппарата, тем самым выполняют формирование в памяти бортовой системы управления летательного аппарата исходных данных о его динамических параметрах и опорной точке маршрута.

Аналитико-числовой метод планирования траектории заключается в учете динамических характеристик БПЛА кусочно-переменной массы для случая, когда точка сброса груза является опорной точкой маршрута, которая может находиться на любом кусочно-постоянном отрезке или полуинтервале траектории полета БПЛА, за исключением первого отрезка, матричной формализации процедуры построения траектории; в введении нового типа матриц – матрицы коэффициентов разложения функции на простейшие дроби в форме Быстрова–Тетерина. Метод не содержит методической погрешности, допускает параллельное выполнение операций с матрицами средствами бортовых вычислителей.

Разработанный аналитико-числовой метод позволяет средствами бортовых средств баллистико-навигационного обеспечения планировать траекторию движения БПЛА одновременно для всех опорных точек маршрута, точек сброса груза и разрыва траектории с учетом уменьшения запасов топлива и массы полезной нагрузки. Данный метод, однако, не позволяет выполнять локальное планирование движения БПЛА по маршруту при внезапном воздействии на летательный аппарат факторов внешней среды, что является предметом дальнейших исследований.

Л и т е р а т у р а

1. Разработка и экспериментальная отработка теоретических основ применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами вертолетного типа взлетной массой до 500 кг при выполнении поисково-спасательных операций на воде : отчет / А. Н. Попов [и др.]. – Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т им. Ю. А. Гагарина, 2017. – 105 с.
2. Пилотажные комплексы и навигационные системы вертолетов / М. Ш. Ковадлин [и др.]. – М. : Инновац. машиностроение, 2017. – 368 с.