

ФОРМИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММЫ АВТОНОМНОГО ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. А. Дудкин, Л. П. Поденок

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Представлена система формирования программы автономного полета (ПП) беспилотного летательного аппарата (БЛА) самолетной схемы из входного набора узловых точек маршрута. ПП формируется с учетом основных динамических характеристик БЛА, физических и конструкционных ограничений, а также аэродинамических характеристик планера. Верификация сформированной ПП выполняется с помощью моделирования полета БЛА. Моделирование выполняется с учетом погрешностей инерциальной навигационной системы, динамики и аэродинамики БЛА, а также метеоусловий.

Введение

Основой полетного задания (ПЗ) БПЛА является программа полета (ПП) — последовательность геопривязанных путевых точек, в которых также задаются время прохождения, параметры полета, функциональная нагрузка (сброс груза, фото и видеосъемка, коррекция ИНС) и прочее. Одним из критериев качества ПЗ является точность исполнения ПП с минимальным траекторным и временным отклонениями, в том числе и в условиях возмущенной атмосферы.

В настоящее время для формирования ПП применяются методы имитационного моделирования маневров БЛА с учетом аэродинамики, его динамических свойств и возможностей управляющей системы (УС) [1]. Также учитываются прогнозируемые на момент исполнения ПП метеоусловия. ПП, составленные без учета вышеназванных факторов зачастую не могут быть выполнены с заданной траекторной и временной точностью, что создает определенные сложности при решении групповых задач.

Автономный полет БЛА по программе характеризуется тем, что основные навигационные измерения, необходимые для траекторного управления, осуществляются исключительно по геофизическим полям. В качестве источника таких измерений обычно выступает инерциальная навигационная система (ИНС).

ПП формируется из последовательности узловых точек маршрута (УТМ), в которых меняется курс БЛА, высота или инициируются те или иные события, и представляет собой последовательность из двух типов команд — команд траекторного управления (путевые точки) и функциональных (точки событий), инициирующих процессы, не связанные с траекторным управлением. Последовательность путевых точек (ПТ) и точек событий (ТС) дополняет множество УТМ. В ПТ существенным образом изменяются состояния актуаторов БЛА, что приводит к выполнению той или иной фазы маневра.

Формирование ПП

Траекторное движение БЛА рассматривается, как последовательность элементарных движений и маневров, выполняемых отдельно в вертикальной и горизонтальной плоскостях. В результате траектория ПП состоит из участков вертикального движения в плоскости ортодромии и координированных разворотов в местной горизонтальной плоскости. Последовательность УТМ, представляющая исходные данные для формирования ПП, формируется вне рассматриваемой системы.

Каждая УТМ характеризуется типом, положением в выбранной геодезической системе координат и скоростью относительно Земли. Узловые точки делятся на три класса — точки изменения вертикального режима полета (ВУТ), точки разворотов (УТР) и узловые точки событий (УТС). Между УТР БЛА движется в плоскости ортодромии, на которой в произвольном порядке и располагаются все ВУТ и УТС.

ПТ смены режима полета (ПТР) формируются из УТР и ВУТ с учетом динамических характеристик и УС БЛА. ПТ событий (ПТС) формируются из УТС с учетом временных и пространственных требований.

Каждой УТР соответствует аэродинамический маневр координированного разворота в горизонтальной плоскости, состоящий из конечных по времени фаз входа, исполнения и выхода, для которых в ПП формируются соответствующие ПТ, а также ПТ выхода на новую ортодромию.

Каждой ВУТ соответствует аэродинамический маневр изменения угла наклона траектории, состоящий из фаз начала и завершения, для которых формируются соответствующие ПТ, а также ПТ начала нового вертикального режима.

Каждой УТС соответствует выполнение некоторого протяженного во времени и/или пространстве процесса, не связанного с изменением режима движения. Для такой УТС формируется комплементарная пара путевых точек начала и завершения события.

Расчет положения ПП и режимов полета в процессе выполнения маневров выполняется на основе динамической модели (ДМ) БЛА, которая включает ДМ продольного движения, ДМ вращения вокруг продольной оси, ДМ аэродинамической балансировки, выработку топлива, а также ДМ управляющей системы.

Верификация перечня узловых точек маршрута

Первая фаза верификации выполняется на стадии формирования ПП из перечня УТМ. Контролируются следующие параметры:

- углы подъема и снижения;
- расстояния между узловыми точками;
- возможность выйти на режим прямолинейного горизонтального полета к моменту начала внешних навигационных измерений для коррекции ИНС;
- возможность скорректировать траекторию после коррекции ИНС по результатам навигационных измерений до выхода на очередную ПТ;
- достижимость цели по запасу топлива.

Максимальный угол подъема в существенной степени зависит от тяговооруженности БЛА, которая в процессе выработки топлива растет, что позволяет к концу полетного задания повысить маневренность. Максимальный угол снижения с постоянной скоростью определяется аэродинамическим качеством БЛА — чем качество ниже, тем угол снижения круче. В случае превышения угла снижения БЛА ускоряется, что может создать проблемы при выходе из режима снижения, вследствие ограничений по прочности. Поскольку начало и завершение маневра имеют протяженность как во времени, так и пространстве, существуют минимальные расстояния между узловыми точками, при которых реализуется четкое маневрирование с предсказуемым результатом в условиях погрешностей определения положения БЛА из-за дрейфа каналов курса и счисления дальности ИНС. Достижимость цели определяется запасом топлива и скоростью его выработки в условиях, например, встречного или бокового ветра.

Вторая фаза верификации выполняется моделированием полета БЛА по программе с учетом погрешностей ИНС, особенностей динамики и аэродинамики БЛА, а также метеоусловий.

Аэродинамика и динамическая модель БЛА

Модель предполагает, что БЛА выполнен по классической самолетной схеме и включает следующие аэродинамические элементы управления — руль высоты (цельноповоротный стабилизатор), руль направления, элероны, двигательную установку и интерцептор. БПЛА в рамках принятой модели предполагается аэродинамически условно устойчивым. Динамическая модель (ДМ) БПЛА включает ДМ продольного движения, ДМ вращения вокруг продольной оси, модели балансировки, а также ДМ управляющей системы. Параметры динамической модели БЛА включают:

- прочностные параметры планера (максимальная положительная и отрицательная нагрузка на крыло), которые используются при расчете перегрузок;
- полетные характеристики (пустой, минимальный и максимальный веса, средний удельный расход топлива, характеристическая площадь, максимальная и минимальная воздушные скорости);
- аэродинамические характеристики, в частности, зависимости коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления от угла атаки, скольжения и скорости;
- характеристики двигательной установки (время установления статического уровня тяги, функция передачи управления тягой на уровень установившейся тяги, максимальное и минимальное значения тяги);
- характеристики элеронов (максимальное отклонение, значение критического крена, время установления скорости крена, передача отклонения элеронов на установившуюся скорость крена);
- характеристики рулей высоты (максимальное отклонение, время установления угла атаки, передача отклонения рулей на установившийся угол атаки);
- характеристики рулей направления (максимальное отклонение, время установления угла скольжения, передача отклонения руля на установившийся угол скольжения).

Функционирование модели управляющей системы основано на сопоставлении планируемых параметров движения и полученных по результатам навигационных измерений с помощью феноменологической модели ИНС и выработке управляющих воздействий на актуаторы и тягу.

Параметры модели системы управления включают:

- параметры двигательной установки (передача отклонения по дальности и скорости на тягу);
- параметры управления рулем высоты (передача отклонения высоты, тангажа/наклона траектории и угловой скорости тангажа на на угол отклонения руля высоты);
- параметры управления элеронами (передача отклонения курса, отклонения по крену и угловой скорости крена, а также бокового отклонения на угол отклонения элеронов);
- параметры управления рулем направления (передача отклонения по скольжению на угол отклонения руля направления).

В основе аэродинамической модели лежит классическая система квазилинейных уравнений, описывающих длиннопериодические движения ЛА на основе дифференциальных уравнений движения центра масс и дифференциальных уравнений для моментов [2, 3]. Аэродинамические силы моделируются с помощью коэффициентов подъемной силы, лобового сопротивления и боковой силы, которые являются функциями угла атаки, угла скольжения и скорости.

Для замыкания системы используются связь между углом атаки и углом отклонения рулей высоты, связь между скоростью крена и углом отклонения элеронов, а также соотношения, описывающие динамику управления тягой.

В рамках модели продольное и боковое движения рассматриваются отдельно. При этом предполагается, что продольное движение сбалансировано по тангажу и скольжению. Динамика продольного и бокового движений описываются с учетом динамики актуаторов. Для учета влияния неспокойной атмосферы на движение в вертикальном направлении в качестве пульсационной составляющей подъемной силы используется случайный процесс с заданной дисперсией и спектром.

Модель ИНС симулирует вековой дрейф начала собственной системы координат (ССК) и вековой поворот ССК вокруг вертикали. Дрейф ССК моделируется по степенному закону, дрейф поворота — по линейному. Остальной дрейф и погрешности измерений не моделируются — предполагается, что ИНС имеет встроенные возможности корректировки вертикали и оптимальной фильтрации измерительного шума. Модель ИНС содержит канал курса, канал ориентации, канал счисления пройденного пути, которые моделируются независимо. Также симулируется выдача воздушной скорости, барометрической высоты, давления и температуры. Курсовая ошибка определяется ошибкой выставки начального курса (распределена по Гауссу) и конечной скоростью дрейфа курса (распределена по Релею). Ошибка счисления пройденного пути с достаточной для расчетов в рамках модели точностью описывается суммой ошибки начальной установки (распределена по Гауссу) и вековой ошибки, которая моделируется эмпирически по степенному закону. Модель позволяет периодически корректировать дрейф ИНС, полагаясь на внешние навигационные измерения, например, по сигналам системы глобального позиционирования (СПП).

Полученная система решается методом Эйлера. В процессе моделирования учитывается выработка топлива и соответствующее изменение массы БЛА, что позволяет выбирать максимальную безопасную перегрузку в процессе выполнения маневров.

Заключение

Выходные данные системы моделирования представляют собой последовательность кинематических состояний в модельном времени и выводятся в табличном виде, который позволяет их использовать для визуализации средствами внешних программ, например, gnuplot. Система моделирования написана на языке программирования C++ (gcc 5.3.1). Время симуляции полета по маршруту продолжительностью 2700 с на платформе Intel Core2 Quad CPU Q9550 2.83GHz под Linux 4.4.6 составляет менее 3 с при шаге модельного времени 0.01 с, что позволяет использовать систему для оценки вероятности выполнимости полетного задания методом Монте-Карло.

Список литературы

1. Kenzo Nonami, et al. Autonomous Flying Robots. Springer 2010. ISBN 978-4-431-53855-4. – 329 P.
2. Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С. Динамика полета БПЛА. – М.: «Машиностроение», 1973. – 616 С.
3. Гуськов Ю. П., Загайнов Г. И. Управление полетом самолетов. – М.: Машиностроение, 1980. – 213 С., ил.