

ОЦЕНИВАНИЕ КООРДИНАТ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МАНЕВРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

У. Р. Наимов

*Кафедра «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; resbn@jesby.tstu.ru*

Ключевые слова: воздушная цель; измерения; маневр; модель; слежение; трехмерная модель.

Аннотация: Рассмотрены особенности создания модели маневренного движения БПЛА в интересах исследования путей повышения точности сопровождения воздушной цели на основе алгоритмов оценивания координат траекторного движения БПЛА.

Для расчета траектории движения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) целесообразно использовать траекторную систему координат Ox_T, Oy_T, Oz_T . Траекторная система координат является подвижной, ее начало помещается на летательном аппарате (ЛА). Ось Ox_T направлена по касательной к траектории БПЛА и совпадает с вектором скорости; ось Oy_T – параллельно земной поверхности. Для оценки параметров движения БПЛА выбираются траекторная Ox_T, Oy_T, Oz_T и нормальная системы координат, лучевая система координат Ox_L, Oy_L, Oz_L и нормальная система координат в радиолокационной станции (РЛС) [1, 2].

Вторичная обработка информации применяется для того, чтобы построить траекторию и оценить параметры движения БПЛА. При объединении траекторных отсчетов параметров вторичная обработка завершается построением траектории цели. Параметры траекторий поступают для совместной обработки, в результате которой дополнительно описываются «ложные» и уточняются «истинные» траектории.

Данная задача включает в себя оценивание параметров траектории, задаваемой обычно векторной функцией, расчет координат цели, а также операцию упорядочивания движения отметок целей. Вторичная обработка информации осуществляется автоматически, с помощью цифровой вычислительной машины (ЦВМ).

Для решения задачи наблюдения целей по дальности обычно формируются оценки дальности \hat{D} и скорости сближения \hat{V} на основе алгоритма α - и β -фильтрации [3].

Исследования показали, что модели, приемлемые для оценок дальности и скорости сближения БПЛА, могут иметь место, если БПЛА движется с постоянной скоростью [3, 4]. При маневрах БПЛА радиальная скорость увеличивается в 3 – 3,5 раза, что является недопустимым в автоматических системах управления воздушным движением для своевременного сопровождения цели. Фильтрация траекторий и применение алгоритмов фильтрации необходимы для сглаживания

данных о наблюдаемых целях и прогнозирования предполагаемого положения цели [5].

Задача построения движения в пространстве решается, как правило, в два этапа. На *первом* этапе формируется набор точек пересечения в пространстве, заданных своими координатами. На *втором* – по сформированному набору точек в трехмерном пространстве строится параметрическая кривая, которая рассматривается в качестве пути следования БПЛА (траектории). Для решения задачи будем использовать трехмерную модель движения БПЛА, представляющую собой систему уравнений движения, записываемую с использованием траекторной системы координат. Тогда положению БПЛА в пространстве соответствуют уравнения равномерного движения:

$$\begin{aligned} X_{\text{БПЛА}}(k) &= X_{0\text{БПЛА}} + V_{X\text{БПЛА}} dtk; & Y_{\text{БПЛА}}(k) &= Y_{0\text{БПЛА}} + V_{Y\text{БПЛА}} dtk; \\ Z_{\text{БПЛА}}(k) &= Z_{0\text{БПЛА}} + V_{Z\text{БПЛА}} dtk, \end{aligned} \quad (1)$$

где $X_{\text{БПЛА}}(k)$, $Y_{0\text{БПЛА}}$, $Z_{\text{БПЛА}}(k)$ – пространственные координаты БПЛА; $X_{0\text{БПЛА}}$, $Y_{0\text{БПЛА}}$, $Z_{0\text{БПЛА}}$ – начало дальности БПЛА; $V_{X\text{БПЛА}}$, $V_{Y\text{БПЛА}}$, $V_{Z\text{БПЛА}}$ – составляющие скорости БПЛА; dt – шаг изменения времени; k – дискретное время.

Выбор модели движения цели определяется с учетом характера ее движения. Следовательно, возникает необходимость проверить работу РЛС в процессе полета реальной цели и, особенно, при ее маневрировании. Наиболее точные данные и достоверная проверка качества функционирования РЛС могут быть получены только при проверке алгоритма на БПЛА в реальном полете с имитацией воздушного объекта.

В простейшем случае считают, что вектор скорости постоянен во времени и БПЛА не маневрирует. В установившемся режиме оценка скорости цели, полученная на основе системы уравнений (1), обеспечит оптимальную оценку скорости цели, если в РЛС отсутствуют ошибки. Таким образом, можно использовать процедуру расчета пространственного движения БПЛА на основе уравнений (1).

Далее можно провести пересчет траектории в полярную систему координат. Тогда дальность и скорость сближения от РЛС до БПЛА определяются соответственно формулам:

$$D_k = \sqrt{(X_{\text{БПЛА}}(k) - Z_k)^2 + (Y_{\text{БПЛА}}(k) - Z_k)^2 + (Z_{\text{БПЛА}}(k) - Z_k)^2},$$

где Z_k – вектор измерения координат БПЛА;

$$V_{\text{сб } k} = \frac{D_k - D_{k-1}}{dt}.$$

Для рассмотренной ситуации изменение истинного значения дальности между РЛС и БПЛА вполне удовлетворяет требованиям для имитации движения цели (рис. 1).

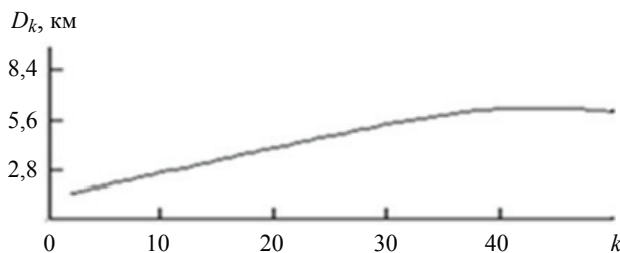


Рис. 1. Зависимость дальности от дискретного времени

В реальности цель не будет иметь постоянной скорости в течение всего времени. Фактически существует неопределенность в параметрах траектории, цель ускоряется или поворачивает в любой момент времени.

В результате цель может выйти за пределы строга системы сопровождения и происходит срыв слежения по дальности. Таким образом, канал слежения за воздушной целью по дальности должен быть в состоянии на основе соответствующего алгоритма фильтрации решать поставленные задачи в условиях маневренного движения БПЛА.

В качестве примера траектории полета показана пространственная кривая, по которой перемещается центр масс БПЛА в процессе его полета (рис. 2). Полет БПЛА может проходить на предельно малых высотах (1...5 м), в складках местности, в условиях применения активных и пассивных помех, определенного уровня инфракрасного излучения и акустического шума и при высокой маневренности БПЛА, резко изменяющей траекторию полета. Подъем на высоту и снижение БПЛА являются участками траектории, которые влияют на точность оценивания дальности.

Оценка высоты полета БПЛА обычно состоит из двух частей: определение скорости полета БПЛА в зависимости от высоты и оценивание соответствующих координат [6]. С помощью двух обычных фильтров Калмана можно создать систему оценивания высоты полета БПЛА.

На рисунке 3 представлено истинное подведение оцениваемой координаты (кривая 1), результирующие оценки первого и второго фильтров $\hat{x}(k)$ и упрощенного алгоритма, созданного на основе объединения отдельных фильтров [7] (кривая 2) и высота БПЛА h_k (кривая 3). Очевидно, что при резком изменении характера поведения параметров траектории точность оценки высоты полета БПЛА существенно не ухудшается для упрощенного алгоритма.

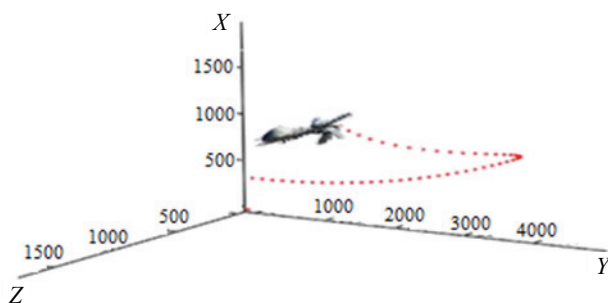


Рис. 2. Траектория движения БПЛА во время перемещения точки

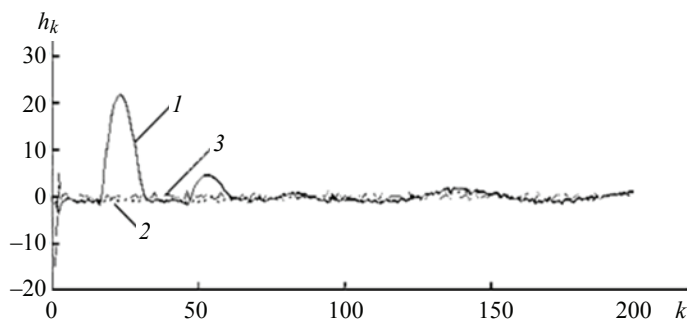


Рис. 3. Результаты измерений высоты полета после фильтрации

Отклонение высоты полета после фильтрации составляет не более 0,5 м. Сложность оценивания координат современных БПЛА обусловлена не только улучшением маневренных характеристик, но и существенным уменьшением их радиолокационной заметности. Снижение эффективной площади отражения цели приводит к уменьшению энергии отраженного сигнала, вызывая соответствующее уменьшение дальности устойчивого сопровождения цели.

Таким образом, создание модели для исследования траекторий движения БПЛА облегчает работу по синтезу систем вторичной обработки.

Список литературы

1. Задорожный, А. И. Автоматизированные системы управления полетами и воздушным движением / А. И. Задорожный. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1998. – 290 с.
2. Тарасенков, А. М. Динамика полета и боевое маневрирование летательного аппарата / А. М. Тарасенков. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986. – 508 с.
3. Данилов, С. Н. Алгоритм прогноза координат воздушных объектов для обеспечения функционирования системы направленной связи на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Р. Р. Шатовкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 530 – 539.
4. Панасюк, Ю. Н. Алгоритмы функционирования дальномерного канала наземных РЛС СУП / Ю. Н. Панасюк, В. В. Луц // Межвузовская научно-техническая конференция «Военная электроника : опыт использования и проблемы подготовки специалистов». – Воронеж : ВИРЭ, 2005.
5. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
6. Федоров, Л. П. Приближенные методы оптимизации характеристик участников набора высоты самолета / Л. П. Федоров // Труды ЦАГИ. – 1987. – Вып. 2366.
7. Наимов, У. Р. Синтез канала слежения за параметрами случайного процесса в условиях их скачкообразного изменения / У. Р. Наимов, С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин // Радиотехника. – 2019. – № 2. – С. 84 – 89. doi: 10.18127/j00338486-201902-16

Estimating Coordinates of Unmanned Aerial Vehicle Based on the Maneuvering Movement Model

U. R. Naimov

*Department of Radio Engineering, TSTU,
Tambov, Russia; resbn@jesby.tstu.ru*

Keywords: aerial target; measurements; maneuver; model; tracking; three-dimensional model.

Abstract: The features of creating a model of maneuverable movement of a UAV are considered in the interest of studying ways to improve the accuracy of tracking an airborne target based on algorithms for estimating the coordinates of the trajectory movement of a UAV.

References

1. Zadorozhnyy A.I. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya poletami i vozдушnym dvizheniyem* [Automated flight control systems and air traffic], Moscow: VVIA im. prof. N. Ye. Zhukovskogo, 1998, 290 p. (In Russ.)
2. Tarasenkov A.M. *Dinamika poleta i boyevoye manevrirovaniye letatel'nogo apparata* [Flight dynamics and combat maneuvering of the flight apparatus], Moscow: VVIA im. prof. N. Ye. Zhukovskogo, 1986, 508 p. (In Russ.)
3. Danilov S.N., Pudovkin A.P., Shatovkin R. R. [Algorithm for predicting the coordinates of airborne objects to ensure the functioning of a directional communication system based on systems with a random change in structure], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 3, pp. 530-539. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Panasyuk Yu.N., Luts V.V. *Mezhvuzovskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Voyennaya elektronika: opyt ispol'zovaniya i problemy podgotovki spetsialistov»* [Interuniversity scientific and technical conference "Military Electronics: Experience of Using and Problems of Specialist Training"], Voronezh: VIRE, 2005, (In Russ.)
5. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnyye metody obrabotki informatsii v radio-tekhnicheskikh sistemakh: monografiya* [Perspective methods of information processing in radio-technical systems: monograph], St. Petersburg: Ekspertnyye resheniya, 2014, 256 p. (In Russ.)
6. Fedorov L.P. [Approximate methods for optimizing the characteristics of aircraft climbers], *Trudy TSAGI* [Proceedings of TsAGI], 1987, issue 2366, (In Russ.)
7. Naimov U.R., Danilov S.N., Pudovkin A.P. [Synthesis of a channel for tracking parameters of a random process under conditions of their abrupt change], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2019, no. 2, pp. 84-89, doi: 10.18127/ j00338486-201902-16 (In Russ.)

Bewertung der Koordinaten eines unbemannten Luftfahrzeugs auf dem Grund des Modells der Manöverbewegung

Zusammenfassung: Es sind die Besonderheiten der Erstellung des Modells der manövrierfähigen Bewegung eines UAV im Interesse der Untersuchung von Möglichkeiten zur Verbesserung der Genauigkeit der Verfolgung eines Luftziels auf der Grundlage von Algorithmen zur Bewertung der Koordinaten der Flugbahnbewegung eines UAV betrachtet.

Évaluation des coordonnées du drone à la base du modèle du mouvement manoeuvrable

Résumé: Sont examinées les particularités de la création d'un modèle du mouvement manoeuvrable des drones afin d'étudier les moyens d'amélioration de la précision de la coprocession de la cible aérienne à la base d'algorithmes d'évaluation des coordonnées du mouvement autoroutier des drones.

Автор: *Наимов Умеджон Разибекович* – аспирант кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.