

11. *Chapple P.B.* Unsupervised detection of mine-like objects in seabed imagery from autonomous underwater vehicles, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2009, pp. 1-6.
12. *Kasatkin B.A., Kosarev G.V.* Rezul'taty primeneniya akusticheskogo profilografa dlya monitoringa morskikh akvatoriy s ispol'zovaniem algoritmov sintezirovaniya i fokusirovki [Results of the application of an acoustic profiler for monitoring marine areas using synthesis and focusing algorithms], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2014, No. 1 (17), pp. 33-38.
13. *Pinto M.* Current and Future Generation of Unmanned MCM Integrated Systems // Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13 - 15 May. 2019.
14. *Brothers R.* MCM planning and evaluation for a UxV Toolbox in a variable mine threat and environment, *Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13-15 May 2019.*
15. Remotely Operated Vehicles for Mine Countermeasures Operation, *Naval Forces*, 2013, Vol. 34, No. 3, pp. 22-26.
16. *Babel, Luitpold, Zimmermann T.* Planning Safe Navigation Routes Through Mined Water, *European Journal of Operational Research*, February 2015, Vol. 241, No. 1, pp. 99-108.
17. *Krogstad T.R., Wiig M.* Autonomous survey and identification planning for AUV MCM operations // Proc. Undersea Defence Technology, Liverpool, UK, 2014.
18. *Wiig M., Krogstad T.R., Midtgaard Ø.* Autonomous identification planning for mine countermeasure, *Proc. Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Southampton, UK, 2012.*
19. *Plekhov A.M.* Slovar' voennykh terminov [Dictionary of military terms]. Moscow: Voenizdat, 1988, 337 p.
20. *Khvoshch V.A.* Taktika PL [Tactics of PL]. Moscow: Voenizdat, 1989, 264 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Л.А. Мартынова.

**Быкова Валентина Сергеевна** – АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"; e-mail: zvs2011@yandex.ru; Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213502298; инженер-программист.

**Машошин Андрей Иванович** – e-mail: aimashoshin@mail.ru; тел.: +79217632345; начальник научно-исследовательского центра; д.т.н.; профессор.

**Пашкевич Иван Владимирович** – e-mail: iv@bk.ru; тел.: +79119330006; главный специалист.

**Bykova Valentina Sergeevna** – JSC "Concern" Central research Institute "Electropribor"; e-mail: zvs2011@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79213502298; software engineer.

**Mashoshin Andrei Ivanovich** – e-mail: aimashoshin@mail.ru; phone: +79217632345; head of the research center; dr. of eng. sc.; professor.

**Pashkevich Ivan Vladimirovich** – e-mail: iv@bk.ru; phone: +79119330006; chief specialist.

УДК 681.5.01

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-101-112

**В.В. Косьянчук, В.В. Гласов, Е.Ю. Зыбин, Л. Тань**

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ПОЛНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ\***

*Большинство методов прогнозирования поведения динамических систем основаны на использовании информации о параметрах их математических моделей. Однако проблемы нестационарности, нелинейности и неидентифицируемости моделей реальных сложных систем приводят к тому что, традиционные параметрические методы применимы на практике только тогда, когда достоверно известны параметры и структура моделей систем, а неопределенности при постановке задачи существенно ограничены. В статье*

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-58-53059.

*описывается оригинальный непараметрический метод прогнозирования траектории полета летательного аппарата в условиях полного отсутствия априорной информации о параметрах его математической модели динамики полета. Предлагаемый метод, в отличие от аналогичных широко известных, не использует логические или статистические вычисления и не требует своего предварительного обучения или длительной настройки. Он построен только на основе ретроспективного анализа нескольких последовательных значений пространственных координат летательного аппарата и его сигналов управления, поэтому не подвержен влиянию модельных ошибок и может быть использован для прогнозирования траектории полета летательного аппарата в условиях полной параметрической неопределенности даже в случае неидентифицируемости модели его динамики полета. Приведены результаты численного моделирования решения задачи прогнозирования траектории полета беспилотного летательного аппарата наиболее распространенного типа квадрокоптера в условиях полной неопределенности параметров его математической модели. Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанного метода и показывают высокие характеристики точности решения задачи и скорости настройки алгоритма. Описанный подход может быть использован для прогнозирования траектории движения любого другого транспортного средства (автомобиля, водного судна и т.д.) при условии линеаризуемости его модели на наблюдаемом интервале времени и наличия информации о его сигналах управления. Практическая реализация описываемого непараметрического метода совместно с традиционными параметрическими позволит повысить точность прогнозирования траектории полета и решить задачу высокоточной посадки беспилотного летательного аппарата на активно маневрирующее судно, в том числе, при возникновении различных критических ситуаций.*

*Летательный аппарат; прогнозирование траектории; непараметрический метод; параметрическая неопределенность.*

**V.V. Kosyanchuk, V.V. Glasov, E.Yu. Zybin, L. Tan**

### **AIRCRAFT FLIGHT PATH PREDICTION UNDER COMPLETE PARAMETRIC UNCERTAINTY**

*Most of the methods for predicting the behavior of dynamic systems are based on the information about the parameters of their mathematical models. However, the problems of nonstationarity, nonlinearity and nonidentifiability of models of real complex systems lead to the fact that traditional parametric methods are applicable in practice only when the parameters and structure of models of systems are reliably known, and the uncertainties in the formulation of the problem are significantly limited. The article describes an original nonparametric method for predicting the aircraft flight path under absence of a priori information about the parameters of its mathematical flight dynamics model. The proposed method, unlike similar widely known ones, does not use logical or statistical calculations and does not require its preliminary training or long-term tuning. It is based only on the basis of a retrospective analysis of several sequential values of the spatial coordinates of the aircraft and its control signals, therefore it is not subject to model errors and can be used to predict the flight path of the aircraft under complete parametric uncertainty, even in the case of non-identifiability of its flight dynamics model. The results of numerical simulation of the solution to the problem of predicting the flight path of an unmanned aerial vehicle of the most common type of quadcopter under complete uncertainty in parameters of its mathematical model are presented. The results obtained confirm the efficiency of the developed method and show high performances of the accuracy of solving the problem and the speed of tuning the algorithm. The described approach can be used to predict the motion path of any other vehicle (car, ship, etc.), if its model is linearizable over the observed time interval and there is information about its control signals. Practical implementation of the described nonparametric method together with traditional parametric ones will improve the accuracy of flight path predicting and solve the problem of high-precision landing of an unmanned aerial vehicle on an actively maneuvering ship, and specifically in the event of various critical situations.*

*Aircraft, flight path prediction, non-parametric method, parametric uncertainty.*

**Введение.** Подавляющее большинство методов прогнозирования поведения динамических систем основаны главным образом на использовании их математических моделей, параметры которых задаются априорно или оцениваются в процессе идентификации или наблюдения вектора состояния [1–3]. Однако проблемы нестационарности и нелинейности моделей реальных сложных объектов приводят к появлению модельных ошибок в задаваемых параметрах, а проблема их неидентифицируемости – к невозможности получения единственного решения задач идентификации и наблюдения вектора состояния [5–6]. В результате традиционные параметрические (parametric) или модельные (model-based) методы применимы на практике только тогда, когда достоверно известны параметры и структура математической модели системы, а неопределенности при постановке задачи существенно ограничены.

С бурным развитием информационных технологий все большее распространение получают непараметрические (nonparametric) методы решения задач теории динамических систем, которые в зарубежной литературе также известны как безмодельные (model-free), основанные на данных (data-driven, data-based), сигналах (signal-based) или прошлых измерениях (history-based) [6–15]. В отличие от традиционных параметрических, непараметрические методы не требуют никакой априорной информации о моделях динамических систем и основаны только на данных измерений их входных и выходных сигналов [16–20]. Такие методы относятся к интеллектуальным, так как рассматривают динамическую систему в виде «черного ящика» и позволяют решать различные задачи теории систем в условиях полной параметрической неопределенности. Поэтому наибольшую эффективность показывают комплексные подходы, основанные на совместном использовании параметрических и непараметрических методов [15].

Широко известные непараметрические методы прогнозирования траектории полета ЛА требуют либо предварительного обучения или длительной настройки, что обуславливает их узкую направленность, либо основаны на статистических (вероятностных) алгоритмах, использующих большие выборки данных измерений. В настоящей работе описан оригинальный непараметрический метод, который, в отличие от аналогичных интеллектуальных методов, не использует логические или статистические вычисления и не требует своего обучения или длительной настройки. Он построен только на основе ретроспективного анализа нескольких последовательных значений пространственных координат ЛА и его сигналов управления, поэтому не подвержен влиянию модельных ошибок и может быть использован для прогнозирования траектории полета ЛА в условиях полной параметрической неопределенности даже в случае неидентифицируемости его модели.

**Непараметрический метод прогнозирования траектории полета ЛА.** Пусть динамика полета ЛА описывается линейной дискретной моделью в пространстве состояний вида «вход-состояние-выход»

$$x_{i+1} = Ax_i + Bu_i, \quad (1)$$

$$y_i = Cx_i, \quad (2)$$

где  $x$  – неизвестный вектор состояния,  $u$  – известный вектор управления;  $y$  – измеряемые пространственные координаты ЛА;  $A, B, C$  – неизвестные матрицы собственной динамики, эффективности управления и измерений;  $i$  – дискретные моменты времени. Введем обозначение для блочных матриц Ганкеля вида

$$Z_i^{n,m} = \begin{bmatrix} z_{i-n-m} & z_{i-n-m+1} & \cdots & z_{i-n} \\ z_{i-n-m+1} & z_{i-n-m+2} & \cdots & z_{i-n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{i-m} & z_{i-m+1} & \cdots & z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i-m}^{n,1} & Z_{i-m+1}^{n,1} & \cdots & Z_i^{n,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i-n}^{1,m} \\ Z_{i-n+1}^{1,m} \\ \vdots \\ Z_i^{1,m} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $m, n$  – количество блочных строк и столбцов, соответственно. Тогда с использованием матриц наблюдаемости  $\mathbf{C}$  и управляемости по выходу  $\mathbf{D}$  можно записать значения выходных сигналов модели (1)–(2) для  $\nu + 1$  измерений в виде

$$Y_i^{\nu,1} = \mathbf{C}x_{i-\nu} + \mathbf{D}U_{i-1}^{\nu-1,1}, \quad (4)$$

где  $\nu$  – индекс наблюдаемости,

$$Y_i^{\nu,1} = \begin{bmatrix} y_{i-\nu} \\ y_{i-\nu+1} \\ y_{i-\nu+2} \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix}, U_{i-1}^{\nu-1,1} = \begin{bmatrix} u_{i-\nu} \\ u_{i-\nu+1} \\ u_{i-\nu+2} \\ \vdots \\ u_{i-1} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^\nu \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{\nu-1}B & CA^{\nu-2}B & CA^{\nu-3}B & \cdots & 0 \end{bmatrix}.$$

С учетом предположения о наблюдаемости модели (1)–(2) зависимые столбцы у матрицы наблюдаемости  $\mathbf{C}$  отсутствуют, следовательно, ее можно представить в виде следующего канонического разложения [21]

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $I$  – единичная матрица, размер которой совпадает с рангом матрицы наблюдаемости;  $\tilde{\mathbf{C}}^L, \bar{\mathbf{C}}^L$  – левые делители единицы и нуля, удовлетворяющие условию

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Подставим (5) в (4)

$$Y_i^{\nu,1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x_{i-\nu} + \mathbf{D}U_{i-1}^{\nu-1,1}, \quad (7)$$

и решим задачи наблюдения векторов состояния для искомого

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x_{i-\nu} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_i^{\nu,1} - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{D}U_{i-1}^{\nu-1,1} \quad (8)$$

и следующего

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x_{i-\nu+1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_{i+1}^{\nu,1} - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{D}U_i^{\nu-1,1} \quad (9)$$

моментов времени, которые в соответствии с (1) также зависят друг от друга

$$x_{i-\nu+1} = Ax_{i-\nu} + Bu_{i-\nu}. \quad (10)$$

Подставим (10) в (9)

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} Ax_{i-\nu} + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} Bu_{i-\nu} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_{i+1}^{\nu,1} - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{D}U_i^{\nu-1,1} \quad (11)$$

и с учетом (8)

$$x_{i-v} = \tilde{\mathbf{C}}^L Y_i^{v,1} - \tilde{\mathbf{C}}^L \mathbf{D} U_{i-1}^{v,1} \quad (12)$$

запишем

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L Y_i^{v,1} - \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L \mathbf{D} U_{i-1}^{v,1} + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} B u_{i-v} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_{i+1}^{v,1} - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{D} U_i^{v,1}. \quad (13)$$

Выразим

$$Y_{i+1}^{v,1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L Y_i^{v,1} + \left( [0 \ \mathbf{D}] - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} [A \tilde{\mathbf{C}}^L \mathbf{D} \ 0] + \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} [B \ 0] \right) U_i^{v,1}.$$

Следовательно окончательно можно записать эквивалентную (1)–(2) модель вида «вход-выход»

$$Y_{i+1}^{v,1} = \mathbf{A} Y_i^{v,1} + \mathbf{B} U_i^{v,1}, \quad (14)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = [0 \ \mathbf{D}] - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} [A \tilde{\mathbf{C}}^L \mathbf{D} \ 0] + \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} [B \ 0]. \quad (16)$$

Предположим, что наблюдение за ЛА ведется на протяжении некоторого времени  $h+1$ , тогда модель (14) примет вид выражения

$$\mathbf{Y}_{i+1}^{v,h} = \mathbf{A} \mathbf{Y}_i^{v,h} + \mathbf{B} \mathbf{U}_i^{v,h}, \quad (17)$$

где

$$\mathbf{Y}_{i+1}^{v,h} = [Y_{i-h+1}^{v,1} \ \dots \ Y_i^{v,1} \ Y_{i+1}^{v,1}], \quad (18)$$

$$\mathbf{Y}_i^{v,h} = [Y_{i-h}^{v,1} \ \dots \ Y_{i-1}^{v,1} \ Y_i^{v,1}], \quad (19)$$

$$\mathbf{U}_i^{v,h} = [U_{i-h}^{v,1} \ \dots \ U_{i-1}^{v,1} \ U_i^{v,1}], \quad (20)$$

из которого можно записать линейной матричное уравнение идентификации параметров эквивалентной модели

$$[\mathbf{A} \ \mathbf{B}] \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_i^{v,h} \\ \mathbf{U}_i^{v,h} \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{i+1}^{v,h}. \quad (21)$$

Известно [21], что любое матричное уравнение вида

$$ZQ = W$$

с известными матрицами  $Q$ ,  $W$  разрешимо относительно  $Z$  тогда и только тогда, когда выполняется условие разрешимости

$$W \bar{Q}^R = 0, \quad (22)$$

где  $\bar{Q}^R$  – правый делитель нуля полного ранга, удовлетворяющий условию

$$Q \bar{Q}^R = 0. \quad (23)$$

Тогда согласно (22) для разрешимости уравнения (21) необходимо и достаточно обеспечить выполнение следующего условия

$$\mathbf{Y}_{i+1}^{v,h} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_i^{v,h} \\ \mathbf{U}_i^{v,h} \end{bmatrix}^R = 0, \quad (24)$$

где правый делитель нуля определяется из выражения

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_i^{v,h} \\ \mathbf{U}_i^{v,h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_i^{v,h} \\ \mathbf{U}_i^{v,h} \end{bmatrix}^R = 0. \quad (25)$$

Тогда прогнозирование вектора измерений осуществляется по формуле

$$\hat{y}_{i+1} = -Y_i^{1,h} R_{i-1} r_i^+, \quad (26)$$

где  $Y_i^{1,h} = [y_{i-h} \ \dots \ y_{i-1} \ y_i]$ ,  $r_i^+$  – псевдообращение, а элементы делителя нуля определяются выражением

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{i-1}^{v,h-1} & Y_i^{v,1} \\ \mathbf{U}_{i-1}^{v,h-1} & U_i^{v,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ r_i \end{bmatrix} = 0. \quad (27)$$

**Решение задачи прогнозирования траектории полета ЛА.** Проверка работоспособности разработанного метода осуществлялась на модели наиболее распространенного беспилотного ЛА (БПЛА) типа «квадрокоптер», построенного по стандартной схеме «X» [22–23]



Рис. 1. Расположение осей связанной системы координат БПЛА

Начало связанной системы координат находится в центре тяжести квадрокоптера. Ось  $X$  указывает направление вдоль носовой части квадрокоптера. Ось  $Y$  направлена вправо, ось  $Z$  направлена вниз, следуя правилу правой руки. Двигатели №1 и №3 вращаются положительно относительно оси  $Z$  и расположены на  $-45$  и  $135$  градусов от оси  $X$ . Двигатели №2 и №4 вращаются отрицательно относительно оси  $Z$  и расположены на  $-135$  и  $45$  градусов от оси  $X$ .

Динамика полета БПЛА при интервале дискретизации  $0,01$  с описывается упрощенной линейной моделью вида (1)–(2), где [24]:

$$u_i = Gv_i, \quad (28)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -a_2 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & a_2 & 0 & 0 & -a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b_1 & b_1 & -b_1 & b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_2 & b_2 & -b_2 & -b_2 \\ b_3 & -b_3 & -b_3 & b_3 \\ -b_4 & -b_4 & -b_4 & -b_4 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & -g_3 & -g_4 \\ -g_1 & g_2 & g_3 & -g_4 \\ g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_1 & g_2 & -g_3 & g_4 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$a_1 = 0.01, a_2 = 0.0981, a_3 = 0.0014, a_4 = 0.9783, a_5 = 0.9838, b_1 = 0.000096, b_2 = 0.0042, b_3 = 0.00313, b_4 = 0.000115, g_1 = 0.3673, g_2 = 152.1807, g_3 = 8.3249, g_4 = 8.3249,$   
 $x = [x_e \ y_e \ z_e \ V_x \ V_y \ V_z \ \gamma \ \vartheta \ \psi \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T, x_0 = 0, x_e, y_e, z_e$  – пространственные координаты (м),  $V_x, V_y, V_z$  – линейные скорости (м/с),  $\gamma, \vartheta, \psi$  – углы крена, тангажа, рысканья (рад),  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – угловые скорости (рад/с),  $u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T,$   
 $u_1, u_2, u_3, u_4$  – скорости вращения двигателей,  $v = [v_\tau \ v_\psi \ v_\vartheta \ v_\gamma]^T, v_\tau, v_\psi, v_\vartheta, v_\gamma$  – задающие воздействия по тяге двигателей, курсу, тангажу и крену.

Для решения задачи прогнозирования траектории полета использовались только сигналы управлений, поступающие с выхода вычислителя системы управления на двигатели, и данные измерений спутниковых или оптических датчиков пространственных координат БПЛА. Схема моделирования показана на рис. 2.

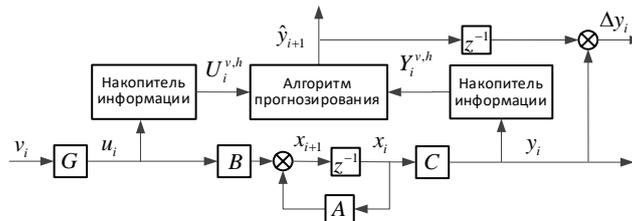


Рис. 2. Схема численного моделирования

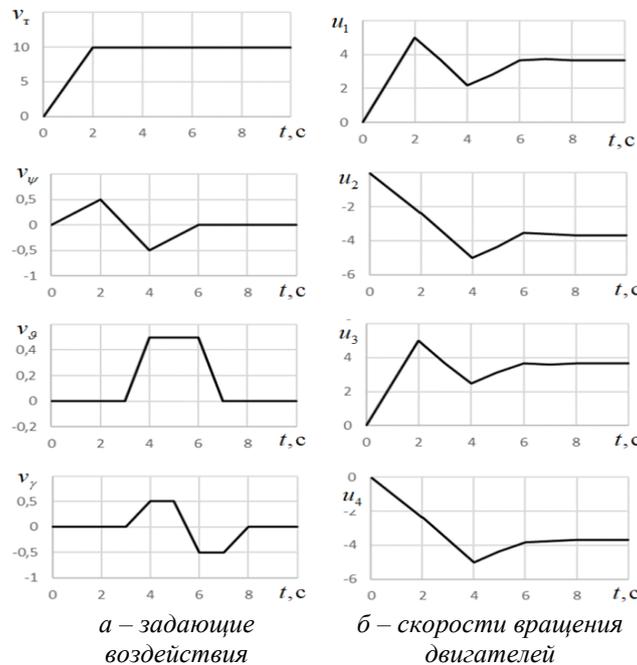


Рис. 3. Сигналы управления БПЛА

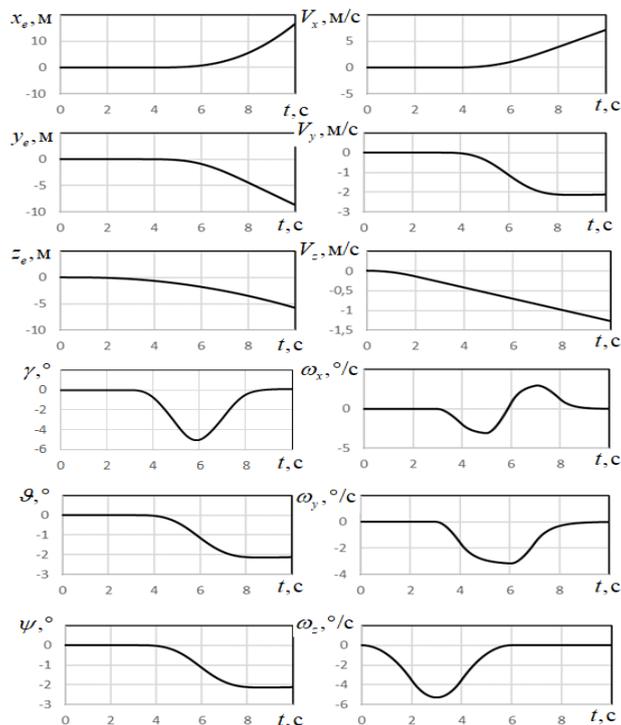


Рис. 4. Параметры полета БПЛА

Для формирования матриц управлений и измерений на интервале наблюдения применялись накопители информации. В блоке синтеза алгоритма прогнозирования реализованы формулы (26)–(27). Ширина окна наблюдения выбрана  $h = 17$ , индекс наблюдаемости  $\nu = 3$ . Сигналы управления и соответствующие им параметры полета БПЛА показаны на (см. рис. 3 и 4).

Ошибки прогнозирования траектории полета БПЛА приведены на рис. 5.

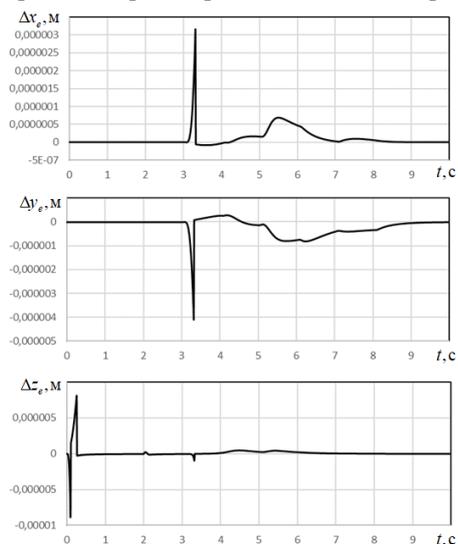


Рис. 5. Ошибки прогнозирования траектории полета БПЛА

Результаты численного моделирования показывают высокие характеристики точности и быстродействия решения задачи. Ошибки прогнозирования траектории полета БПЛА не превышают 5-го десятичного знака по всем пространственным координатам. Ранг матрицы Ганкеля данных не превышает 6, поэтому настройка алгоритма происходит в течение 8 измерений, то есть всего за 0,08 с, при появлении зависимых столбцов, а, следовательно, и правого делителя нуля вида (27).

**Заключение.** В результате проведенных исследований разработан новый непараметрический метод прогнозирования траектории полета ЛА, не использующий априорной информации о параметрах его модели и основанный только на ретроспективном анализе нескольких последовательных значений его пространственных координат и сигналов управления. Предлагаемый метод не подвержен модельным ошибкам, в отличие от аналогичных, не использует статистические вычисления, не требует обучения или длительной настройки и может быть использован даже при неидентифицируемости модели динамики полета ЛА. Полученные результаты численного моделирования решения задачи прогнозирования траектории полета БПЛА подтверждают работоспособность разработанного метода в условиях полной параметрической неопределенности. Описанный подход может быть использован для прогнозирования траектории движения любого другого транспортного средства (автомобиля, водного судна и т.д.) при условии линейности его модели на наблюдаемом интервале времени и наличия информации о его сигналах управления.

Дальнейшие исследования в данном направлении предполагают развитие подхода применительно к задачам прогнозирования траекторий движения БПЛА и судна посадки в условиях отсутствия информации о сигналах управления, только по результатам наблюдения их пространственных координат. Практическая реализация разрабатываемых непараметрических методов совместно с традиционными параметрическими позволит повысить точность прогнозирования и решить задачу высокоточной посадки БПЛА на активно маневрирующее судно, в том числе, при возникновении различных критических ситуаций: шквалистый ветер, потеря связи или включение режима радиомолчания, мелкие повреждения корпуса или несущих винтов и т.д.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 232 с.
2. Рабочая книга по прогнозированию / Редкол.: Бестужев-Лада И.В. (отв. ред.). – М.: Мысль, 1982. – 430 с.
3. Roffel B., Betlem B. Process dynamics and control: modeling for control and prediction. – West Sussex: John Wiley & Sons, 2006. – 543 p.
4. Зыбин Е.Ю. Об идентифицируемости линейных динамических систем в замкнутом контуре в режиме нормальной эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 4 (166). – С. 160-170.
5. Зыбин Е.Ю., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. О решении задачи идентификации линейных дискретных систем методом канонизации // Вестник ИГЭУ. – 2005. – № 5. – С. 192-196.
6. Hilgert N., Rossi V., Vila J.-P., Wagner V. Identification, Estimation, and Control of Uncertain Dynamic Systems: A Nonparametric Approach // Communications in Statistics – Theory and Methods. – 2007. – Vol. 36, No. 14. – P. 2509-2525.
7. Kutz J.N. Data-driven Modeling & Scientific Computation: Methods for Complex Systems & Big Data. – Oxford: Oxford University Press, 2013. – 638 p.
8. Schwabacher M. A Survey of Data-driven Prognostics // AIAA Infotech@Aerospace. – 2005. – P. 7002.
9. Yin S., Li X., Gao H., Kaynak O. Data-based Techniques Focused on Modern Industry: An Overview // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – Vol. 62, No. 1. – P. 657-667.

10. Hou Z., Jin S. Model Free Adaptive Control: Theory and Applications. – New-York: CRC press, 2013. – 372 p.
11. Satriawan Y.S., Machbub C., Hidayat E.M.I. Comparison of prediction methods for moving objects in 3D coordinates using Kalman filter and least square // 2016 6th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET). – IEEE, 2016. – P. 128-131.
12. Wang Z., Liang M., Delahaye D. Short-term 4d trajectory prediction using machine learning methods // Proc. SID. – 2017. – P. 1-10.
13. Shi Z. et al. LSTM-based flight trajectory prediction // 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – IEEE, 2018. – P. 1-8.
14. Lian K.Y., Yang C.Y. Image recognition system with predicting flying object path using 3D sensors // 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – IEEE, 2014. – P. 2317-2321.
15. Xie G. et al. Vehicle trajectory prediction by integrating physics-and maneuver-based approaches using interactive multiple models // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 65, No. 7. – P. 5999-6008.
16. Chekin A.Yu., Bondarenko Yu.V., Zybin E.Yu., Kiselev M.A. Nonparametric method for aircraft state prediction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 476. – P. 012003.
17. Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю., Чекин А.Ю., Бондаренко Ю.В. О прогнозировании вектора состояния воздушного судна в условиях полной параметрической неопределенности // Перспективные системы и задачи управления: Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 234-239.
18. Зыбин Е.Ю., Гласов В.В., Чекин А.Ю. Непараметрический метод прогнозирования движения судна посадки беспилотного летательного аппарата // Сб. тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем», 26–27 ноября 2020 г., г. Москва, 2020. – С. 212-213.
19. Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Карпенко С.С. О некоторых непараметрических методах теории управления динамическими объектами // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. – 2018. – № 6. – С. 288-298.
20. Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю., Гласов В.В., Чекин А.Ю., Карпенко С.С., Бондаренко Ю.В. Методы решения некоторых задач теории линейных динамических систем в условиях полной параметрической неопределенности // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Сб. трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 724-729.
21. Зыбин Е.Ю., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. О минимальной параметризации решений линейных матричных уравнений // Вестник ИГЭУ. – 2004. – № 6. – С. 127-131.
22. Prouty R. Helicopter Performance, Stability, and Control. – PWS Publishers, 2005.
23. Ponds P., Mahony R., Corke P. Modelling and control of a large quadrotor robot. Control Engineering Practice. – 2010.
24. Гласов В.В., Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В. Непараметрический метод стабилизации пространственного положения беспилотного летательного аппарата // Матер. конференции «Управление в аэрокосмических системах» (УАКС-2020) им. академика Е.А. Микрина. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. – С. 22-25.

## REFERENCES

1. Bukov V.N. Adaptivnye prognoziruyushchie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control systems]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987, 232 p.
2. Rabochaya kniga po prognozirovaniyu [Working book on forecasting], ed. by Bestuzhev-Lada I.V. Moscoq: Mysl', 1982, 430 p.
3. Roffel B., Betlem B. Process dynamics and control: modeling for control and prediction. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006, 543 p.
4. Zybin E.Yu. Ob identifikatsionnosti lineynykh dinamicheskikh sistem v zamknutom konture v rezhime normal'noy ekspluatatsii [On the identifiability of linear dynamical systems in a closed circuit in the normal operation mode], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 4 (166), pp. 160-170.

5. Zybin E.Yu., Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N. O reshenii zadachi identifikatsii lineynykh diskretnykh sistem metodom kanonizatsii [On solving the problem of identification of linear discrete systems by the method of canonicalization], *Vestnik IGEU* [Bulletin of the IGEU], 2005, No. 5, pp. 192-196.
6. Hilgert N., Rossi V., Vila J.-P., Wagner V. Identification, Estimation, and Control of Uncertain Dynamic Systems: A Nonparametric Approach, *Communications in Statistics – Theory and Methods*, 2007, Vol. 36, No. 14, pp. 2509-2525.
7. Kutz J.N. Data-driven Modeling & Scientific Computation: Methods for Complex Systems & Big Data. Oxford: Oxford University Press, 2013, 638 p.
8. Schwabacher M. A Survey of Data-driven Prognostics, *AIAA Infotech@Aerospace*, 2005, pp. 7002.
9. Yin S., Li X., Gao H., Kaynak O. Data-based Techniques Focused on Modern Industry: An Overview, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, Vol. 62, No. 1, pp. 657-667.
10. Hou Z., Jin S. Model Free Adaptive Control: Theory and Applications. New-York: CRC press, 2013. 372 p.
11. Satriawan Y.S., Machbub C., Hidayat E.M.I. Comparison of prediction methods for moving objects in 3D coordinates using Kalman filter and least square, *2016 6th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*. IEEE, 2016, pp. 128-131.
12. Wang Z., Liang M., Delahaye D. Short-term 4d trajectory prediction using machine learning methods, *Proc. SID*, 2017, pp. 1-10.
13. Shi Z. et al. LSTM-based flight trajectory prediction, *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. IEEE, 2018, pp. 1-8.
14. Lian K.Y., Yang C.Y. Image recognition system with predicting flying object path using 3D sensors, *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE, 2014, pp. 2317-2321.
15. Xie G. et al. Vehicle trajectory prediction by integrating physics-and maneuver-based approaches using interactive multiple models, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, Vol. 65, No. 7, pp. 5999-6008.
16. Chekin A.Yu., Bondarenko Yu.V., Zybin E.Yu., Kiselev M.A. Nonparametric method for aircraft state prediction, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 476, pp. 012003.
17. Kos'yanchuk V.V., Zybin E.Yu. Chekin A.Yu., Bondarenko Yu.V. O prognozirovani vektora sostoyaniya vozdušnogo sudna v usloviyakh polnoy parametricheskoy neopredelennosti [On predicting the state vector of an aircraft under conditions of complete parametric uncertainty], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Perspective systems and management tasks: Materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference and the X Youth School-Seminar "Management and Information Processing in Technical Systems"]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 234-239.
18. Zybin E.Yu., Glasov V.V., Chekin A.Yu. Neparаметрический метод прогнозирования движения судна посадки беспилотного летательного аппарата [Nonparametric method of predicting the movement of the landing craft of an unmanned aerial vehicle], *Sb. tezisev dokladov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem», 26–27 noyabrya 2020 g., g. Moskva, 2020* [Collection of abstracts of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference "Modeling of Aviation Systems", November 26-27, 2020, Moscow, 2020], pp. 212-213.
19. Zybin E.Yu., Kos'yanchuk V.V., Karpenko S.S. O nekotorykh neparаметриcheskikh metodakh teorii upravleniya dinamicheskimi ob"ektami [On some non-parametric methods, control theory, dynamic objects], *Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo* [Scientific readings in aviation, dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky], 2018, No. 6, pp. 288-298.
20. Kos'yanchuk V.V., Zybin E.Yu., Glasov V.V., Chekin A.Yu., Karpenko S.S., Bondarenko Yu.V. Metody resheniya nekotorykh zadach teorii lineynykh dinamicheskikh sistem v usloviyakh polnoy parametricheskoy neopredelennosti [Methods for solving some problems of the theory of linear dynamical systems under conditions of complete parametric uncertainty], *XIII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019: Sb. trudov XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019. Institut problem*

- upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2019 [XIII All-Russian Meeting on VSPU Management Problems-2019: Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on VSPU Management Problems-2019. V.A. Trapeznikov Institute of Control Problems of the Russian Academy of Sciences, 2019], pp. 724-729.*
21. Zybin E.Yu., Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N. O minimal'noy parametrizatsii resheniy lineynykh matrichnykh uravneniy [On the minimal parametrization of solutions of linear matrix equations], *Vestnik IGEU* [Bulletin of the IGEU], 2004, No. 6, pp. 127-131.
  22. Prouty R. Helicopter Performance, Stability, and Control. PWS Publishers, 2005.
  23. Ponds P., Mahony R., Corke P. Modelling and control of a large quadrotor robot. *Control Engineering Practice*. 2010.
  24. Glasov V.V., Zybin E.Yu., Kos'yanchuk V.V. Neparаметрический метод стабилизации пространственного положения беспилотного летательного аппарата [Nonparametric method for stabilizing the spatial position of an unmanned aerial vehicle], *Mater. konferentsii «Upravlenie v aerokosmicheskikh sistemakh» (UAKS-2020) im. akademika E.A. Mikrina* [Proceedings of the conference "Management in Aerospace Systems " (UAKS-2020) named after Academician E.A. Mikrin]. Saint Petersburg: АО «Kontsern «TSNII «Elektroprigor», 2020, pp. 22-25.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Сельвесюк.

**Косьянчук Владислав Викторович** – ФУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»; e-mail: vvk@2100.gosniias.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74997590069; д.т.н.; профессор; зам. генерального директора.

**Гласов Владислав Валерьевич** – e-mail: aychekin@2100.gosniias.ru; к.т.н.; начальник лаборатории.

**Зыбин Евгений Юрьевич** – e-mail: eyzybin@2100.gosniias.ru; д.т.н.; начальник лаборатории.

**Тань Лиго** – Научно-исследовательский центр фундаментальных космических наук, Харбинский политехнический институт; e-mail: tanlihuo@hit.edu.cn; г. Харбин, Китай; тел.: +15504655181\0451-86402989; доцент.

**Kosyanchuk Vladislav Viktorovich** – FGUP «State Research Institute of Aviation Systems»; e-mail: vvk@2100.gosniias.ru; Moscow, Russia; phone: +74997590069; dr. of eng. sc.; professor; deputy director general.

**Glasov Vladislav Valer'yevich** – e-mail: vvglasov@2100.gosniias.ru; cand. of eng. sc.; head of laboratory.

**Zybin Eugene Yuryevich** – e-mail: eyzybin@2100.gosniias.ru; dr. of eng. sc.; head of laboratory.

**Tan Ligu** – Research Center of Basic Space Science, Harbin Institute of Technology; e-mail: tanlihuo@hit.edu.cn; Harbin, China; phone: +15504655181\0451-86402989; associate professor.

УДК 004.942

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-112-124

**М.И. Мокрова**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ ПОЖАРНОЙ ОБСТАНОВКИ НА КАЧЕСТВО НАБЛЮДЕНИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЁТА БЛА**

*Авиационный мониторинг пожаров с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА), в частности, лесных, в процессе которого производится поиск различных объектов интереса: людей, автомобилей и пр., является одним из наиболее эффективных мероприятий по снижению уровня возможных потерь. В представленной работе рассматриваются подходы к формированию алгоритмов обработки и улучшения изображений, получаемых в процессе выполнения мониторинга пожарной обстановки, основанные на использовании нейросетей, а также алгоритмов фильтрации изображений, с целью поиска различных*