



Для цитирования

For citation

Алтынников Д. С. Анализ деформаций железнодорожного пути на участках подходов к металлическим мостам с безбалластными мостовым полотном на Восточно-Сибирской железной дороге / Д. С. Алтынников, Д. А. Ковенькин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2017. — Т. 56, № 4. — С. 176–183. — DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).176-183.

Altynnikov D. S., Koven'kin D. A. Analiz deformatsii zheleznodorozhnogo puti na uchastkakh podkhodov k metallicheskim mostam s bezballastnym mostovym polotnom na vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroge [The analysis of the railway track deformations in the areas of approaches to metal ballastless bridges on the East-Siberian railway]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017. Vol. 56, No. 4, pp. 176–183. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).176-183.

УДК 621.396.96

DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).183-188

П. Ю. Пушкин¹, В. В. Ерохин²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 16 ноября 2017 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Стратегия развития организации управления движения предъявляет высокие требования к качеству навигационных определений динамических управляемых объектов. В реальных условиях на точность определения параметров траекторного движения влияют боковой ветер, различного рода возмущения и помехи. В статье предложена модель траекторного движения динамического управляемого объекта на основе комплексной обработки информации в триадной интегрированной системе навигации. Разработанная модель может быть использована для стандартных навигационных расчетов при описании движения подвижных объектов в горизонтальной плоскости на прямолинейных участках, а также процесса разворота. Показано, что погрешности навигационных определений приводят к отклонению оценочных значений параметров траекторного движения от истинных. Поэтому, при формировании траектории полета необходимо учитывать погрешности оценки параметров траекторного движения при воздействии дестабилизирующих факторов. Синтезирован алгоритм оптимизации траектории в пространстве состояний на основе методов теорий оптимального управления и оптимальной фильтрации. Моделировалась ситуация формирования траектории управляемого движения на основе решения задачи навигационно-временных определений в триадной интегрированной системе навигации на основе инерциальных и спутниковых технологий. Методами имитационного статистического моделирования исследованы характеристики предложенной модели траекторного движения и алгоритма комплексной обработки навигационной информации. Приведены результаты расчета оценок навигационных параметров на основе алгоритма фильтрации в бортовой вычислительной системе.

Ключевые слова: динамический управляемый объект, оптимизация, математическая модель, управление траекторией, фильтр Калмана, интегрированная система навигации, погрешности навигационных определений.

P. Yu. Pushkin¹, V. V. Erokhin²

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, the Russian Federation

Received: November 16, 2017

MODELING OF THE TRAJECTORY OF A DYNAMIC CONTROLLED OBJECT BASED ON INTEGRATED PROCESSING OF NAVIGATIONAL INFORMATION

Abstract. The development strategy of the traffic management organization sets high standards on the quality of navigation definitions of dynamic controlled objects. In real conditions, the accuracy of determining the parameters of the trajectory motion is affected by the lateral wind, various kinds of perturbations and disturbances. The article proposes a model of trajectory motion of a dynamic controlled object based on complex information processing in a triad integrated navigation system. The developed model can be used for standard navigation calculations in describing the movement of mobile objects in the horizontal plane on straight sections, as well as the turnaround process. It is shown that the errors in navigational definitions lead to a deviation of the estimated values of the parameters of the trajectory motion from the true ones. Therefore, when forming the flight path, it is necessary to take into account the errors in estimating the parameters of the trajectory motion under the influence of destabilizing factors. The algorithm for optimizing the trajectory in the state space is synthesized based on the methods of optimal control theories and optimal filtering. The situation was simulated for the formation of a controlled motion trajectory based on the solution of the problem of navigational and temporal determinations in a triad integrated navigation system based on inertial and satellite technologies. Using the methods of simulation statistical modeling, the characteristics of the proposed model of the trajectory motion and the algorithm for complex processing of navigation information are investigated.



tingated. The results of calculation of navigational parameter estimates on the basis of the filtering algorithm in the on-board computer system are presented.

Keywords: a dynamic controlled object, an optimization, a mathematical model, a trajectory control, the Kalman filter, an integrated navigation system, inaccuracies in navigational definitions.

Введение

Выбор модели траекторного движения динамического управляемого объекта (ДУО) всегда дискуссионен, т. к. должен являться компромиссом между точностью описания и сложностью. Известно большое число моделей, отличающихся различной степенью полноты и сложности [1-7].

В реальных условиях на траекторию движения оказывают влияние различные дестабилизирующие факторы, поэтому реализация программных алгоритмов в реальных условиях наталкивается на многочисленные трудности. К ним относятся боковой ветер, влияние возмущений и помех на точность определения параметров траекторного движения, а также ограничения, связанные с наличием запретных зон [1-7].

Для описания установившегося движения на участках программных траекторий летательного аппарата (ЛА), когда управляющие и возмущающие воздействия принимают постоянные значения, используется математическая модель, которую называют основной (полной) [1-7].

Ввиду сложности математического описания полную модель целесообразно использовать лишь в качестве эталонной как при моделировании проверки работоспособности алгоритмов, так и при оценке адекватности упрощенных математических моделей. Полная система дифференциальных уравнений, описывающая движение ДУО, может быть получена путем сокращения и некоторого видоизменения уравнений движения ЛА. Различие заключается в том, что вертикальная степень свободы не используется. При этом если пренебречь сжатием рессор и обжатием пневматиков шасси, то можно не учитывать малоизменяющиеся параметры, такие как крен и тангаж. Однако такое допущение не всегда приемлемо. В частности, при движении автомобиля важную роль играет сила сцепления колес с поверхностью, по которой осуществляется движение. Силы сцепления зависят от нормальных сил давления, образующихся при распределении силы веса между колесами, зависящих от углов крена и тангажа. Силы сцепления обуславливают силы сопротивления движению (и торможения), а также влияют на «занос» автомобиля [2]. Для решения задач навигации и управления ДУО эти явления не учитываются, что позволяет упростить математическую модель [2, 8, 9].

Для решения задачи определения параметров траекторного движения бортовыми средства-

ми необходимо создание эффективных алгоритмов на основе комплексной обработки навигационной информации.

Синтез алгоритмов оптимизации траекторий в пространстве состояний основывается на методах теории оптимального управления, составной частью которой является теория оптимального оценивания в задачах комплексной обработки навигационной информации [10-17].

Цель работы – синтез и исследование модели траекторного движения динамического управляемого объекта на основе комплексной обработки навигационной информации.

Математическая модель

Для описания установившегося движения на участках программных траекторий, когда управляющие и возмущающие воздействия принимают постоянные значения, а переходными процессами можно пренебречь, используется математическая модель, описывающая движение на воздушном участке [8, 9]:

$$\begin{cases} x' = V \cos \psi + v_x, \\ z' = V \sin \psi + v_z, \\ \psi' = \omega_{\max} u, \end{cases} \quad (1)$$

где x и z – координаты положения ДУО в нормальной земной системе координат Oxz ; ψ – угол поворота траектории; $\omega_{\max} = k/V$ – максимальная величина допустимой угловой скорости; $k = \text{const} > 0$ – максимальная величина допустимого бокового ускорения; $V > 0$ – приборная скорость в отсутствие возмущений; v_x и v_z – составляющие вектора скорости ветра; u – управление, удовлетворяющее ограничению $|u| \leq 1$.

Система уравнений (1) используется для стандартных навигационных расчетов при описании движения подвижных объектов в горизонтальной плоскости на прямолинейных участках, а также процесса разворота. Принимаются следующие допущения относительно параметров системы (1): величина приборной скорости полагается постоянной $V = \text{const}$; управление объектом с управляемой траекторией полета полагается ограниченным по модулю $|u| \leq 1$.

Интегрированием системы дифференциальных уравнений (1) в работах [8, 9] найдены аналитические решения при использовании разных типов программного управления и показано, что движение с динамикой (1) в классе кусочно-



постоянных управлений представляет собой комбинацию прямолинейных участков и участков движения по окружности.

Постановка задачи

В соответствии с моделью траекторного движения (1) вектор заданных фазовых координат запишем в виде $\mathbf{x}_3 = [x_3, z_3, \psi_3]^T$. Уравнение динамики заданной траектории можно представить следующим образом:

$$\mathbf{x}_{3,v+1} = \Phi_{3,v/v+1} \mathbf{x}_{3,v}, \quad (2)$$

где $v = \overline{0, N-1}$ - временной индекс; N - количество отсчетов, $\Phi_{3,v}$ - матрица динамики системы.

Вследствие воздействия возмущений и помех точная реализация этого движения, как правило, невозможна. В задаче оптимизации траектории полагаем, что имеется объект управления - некоторая заданная управляемая динамическая система, отображающаяся в своем пространстве состояний вектором управляемых переменных состояния \mathbf{x}_y . Вектор управляемых фазовых координат запишем в виде $\mathbf{x}_y = [x_y, z_y, \psi_y]^T$. Уравнение динамики для управляемой траектории представим в виде [10-17]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{y,v+1} &= g(\mathbf{x}_{y,v}, \mathbf{u}_v) + \mathbf{G}_{y,v/v+1} \mathbf{w}_{y,v} = \\ &= \Phi_{y,v/v+1} \mathbf{x}_{y,v} + \mathbf{B}_{y,v/v+1} \mathbf{u}_v + \mathbf{G}_{y,v/v+1} \mathbf{w}_{y,v}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Phi_{y,v}$ - матрица динамики системы; матрицы динамики $\Phi_{3,v}$ и $\Phi_{y,v}$ в уравнениях (2) и (3) одинаковы; $\mathbf{B}_{y,v} = [0, 0, \omega_{\max} \Delta t]^T$ - вектор коэффициентов управляющих воздействий системы, $\mathbf{G}_{y,v}$ - матрица ограничений на шумы системы; $\mathbf{w}_{y,v}$ - вектор дискретных белых гауссовских шумов (ДБГШ) с нулевыми математическими ожиданиями и матрицей дисперсий Θ_y ; \mathbf{u}_v - вектор управляющих воздействий; $\mathbf{u} \in U$ - множество допустимых значений управлений, которые не связаны между собой.

Оценка параметров траекторного движения осуществляется на основе комплексной обработки информации (КОИ) в интегрированной системе навигации (ИСН). Модель наблюдений в интегрированной системе навигации (ИСН) представляет собой измерения псевдодальностей до навигационных опорных точек (НОТ). Для m -мерного вектора наблюдения уравнение измерений представим в виде

$$\xi_v = \mathbf{s}_v(g(\mathbf{x}_{y,v}, \mathbf{u}_v)) + \mathbf{n}_v = \mathbf{H}_{y,v} \mathbf{x}_{y,v} + \mathbf{n}_v, \quad (4)$$

где $\xi_v = [\xi_{1,v}, \dots, \xi_{m,v}]^T$, m - количество наблюдаемых сигналов; \mathbf{n}_v - m -мерный вектор ДБГШ с нулевыми математическими ожиданиями и матрицей дисперсий; $\mathbf{H}(\tilde{\mathbf{x}}_{y,v})$ - матрица направляющих косинусов линии визирования потребитель - источник навигационного сигнала; полагаем, что шумы $\mathbf{w}_{y,v}$ и \mathbf{n}_v независимы.

Для решения задачи оптимального управления в реальных системах используют локальный критерий оптимизации. При решении практических задач траекторного управления динамическими объектами потери зависят не от абсолютных значений, а от их разности или ошибки, при этом показателем качества является обобщенный квадратичный функционал ошибки управления [10-17]. Для поиска оптимального управления будем использовать квадратичный критерий качества, который в теории оптимального управления в общем виде записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} J_v &= \min_{\mathbf{u} \in U} M \{ (\mathbf{x}_{y,v} - \hat{\mathbf{x}}_{y,v})^T \mathbf{Q}_v (\mathbf{x}_{y,v} - \hat{\mathbf{x}}_{y,v}) \} = \\ &= \min_{\mathbf{u} \in U} M [c_v(\mathbf{x}_{y,v}, \hat{\mathbf{x}}_{y,v})], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{x}_{y,v}$ - значение вектора состояния управляемых фазовых координат; $\hat{\mathbf{x}}_{y,v}$ - оценка вектора состояния; $c_v(\mathbf{x}_{y,v}, \hat{\mathbf{x}}_{y,v})$ - заданная неотрицательно определенная квадратичная функция текущих потерь, характеризующая текущие (удельные) потери в v -й момент времени, которая возрастает с увеличением отклонения управляемой траектории относительно заданной, \mathbf{Q}_v - симметричная неотрицательно определенная матрица штрафов на ошибки параметров вектора состояния, которая характеризует степень важности отслеживания той или иной компоненты траектории; \mathbf{u}_v - вектор управления в момент времени t_v ; $M\{\}$ - знак математического ожидания.

Комплексная обработка информации в ИСН на основе триадного принципа

Перспективным направлением реализации триадного принципа комплексирования навигационных измерителей является объединение в составе ИСН бортового оборудования (БО) глобальной навигационной спутниковой системы ГНСС, транспондера системы автоматического зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В) и бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) [14-16].

Изложенная в [14-16] постановка задачи синтеза комплексной системы фильтрации с использованием всей совокупности доступных



наблюдений предполагает использование стандартного аппарата теории оптимальной фильтрации. Методы калмановской фильтрации, активно используемые при построении современных интегрированных навигационных систем различных типов, основанных на использовании инерциальных и спутниковых технологий и их комбинаций, показывают высокую эффективность [10-17].

Считаем, что в ИСН реализуется алгоритм двухэтапной КОИ от навигационных датчиков. Для синтеза алгоритма комплексирования на уровне вторичной обработки навигационной информации необходимо сформировать вектор наблюдений на его входе и определить состав оцениваемого вектора состояния, а также учесть всю априорную информацию о системе в виде соответствующих моделей, описывающих стохастическую динамику вектора состояния и его связь с вектором наблюдения. В частности, модель наблюдений в ИСН представляет собой измерение псевдодальностей до навигационных спутников (НС) ГНСС и ДУО, взаимодействующих в сети АЗН-В:

$$\xi_v = \mathbf{s}(t_v, \mathbf{x}_{\text{НОТ},v}, \mathbf{x}_v) + \mathbf{n}_v = \mathbf{D}_v + c\mathbf{T}_v + \mathbf{n}_{\xi,v}, \quad (6)$$

где $\mathbf{x}_{\text{НОТ},j} = [x_j, y_j, z_j]^T$, $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$ – векторы координат j -й НОТ и ДУО; $D = [(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2]^{1/2}$ – дальность; $c\mathbf{T}$ – смещение шкалы времени (ШВ) ДУО относительно системного; \mathbf{n}_{ξ} – m -мерный вектор шума наблюдения, принимаемый ДБГШ с нулевыми математическими ожиданиями матрицей дисперсий \mathbf{V} .

Всю совокупность спутниковых наблюдений и наблюдений в системе АЗН-В можно представить в векторном виде:

$$\xi_v = [\xi_{1v}, \dots, \xi_{lv}, \xi_{(l+1)v}, \dots, \xi_{mv}]^T$$

где l – количество НС, m – общее количество НС и НОТ.

В соответствии с теоремой разделения или стохастической эквивалентности, задачи синтеза оптимального управления и оптимальной фильтрации можно решать отдельно [11]. Применительно к (3), (6) плотность вероятности экстраполированного значения вектора состояния, входящая в выражение (8), на каждом шаге является нормальной: $p(\mathbf{x}_v | \xi_1^{v-1}) = N\{\tilde{\mathbf{x}}_v, \tilde{\mathbf{R}}_v\}$. Параметры этой плотности вероятности определяются на основе фильтра Калмана [10-17]:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_v &= \Phi_{v/v-1} \hat{\mathbf{x}}_{v-1} + \mathbf{B}_v \mathbf{u}_v, \\ \hat{\mathbf{x}}_v &= \tilde{\mathbf{x}}_v + \mathbf{K}_v [\xi_v - \mathbf{H}_v \tilde{\mathbf{x}}_v], \end{aligned}$$

$$\mathbf{K}_v = \mathbf{R}_v \mathbf{H}_v^T \mathbf{V}_v^{-1},$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_v = \Phi_{v/v-1} \mathbf{R}_v \Phi_{v/v-1}^T + \mathbf{G}_{v/v-1} \mathbf{Q}_v \mathbf{G}_{v/v-1}^T,$$

$$\mathbf{R}_v^{-1} = \tilde{\mathbf{R}}_v^{-1} + \mathbf{H}_v^T \mathbf{V}_v^{-1} \mathbf{H}_v.$$

Используя полученные соотношения, получим [11, 13]:

$$\begin{aligned} J_v &= M \left\{ c_v(\mathbf{x}_v, \mathbf{u}_v) \Big|_{\xi_1^{v-1}} \right\} = \\ &= \tilde{\mathbf{x}}_v^T \mathbf{Q}_v \tilde{\mathbf{x}}_v + tr \{ \tilde{\mathbf{Q}}_v \tilde{\mathbf{R}}_v \} + \mathbf{u}_v^T \mathbf{P}_v \mathbf{u}_v, \end{aligned}$$

где tr – математическая операция нахождения следа матрицы.

Оптимальное управление, минимизирующее данный критерий, находится следующим образом. Так как $tr\{\tilde{\mathbf{Q}}_v \tilde{\mathbf{R}}_v\} = const(\mathbf{u}_v)$ не зависит от управления, тогда [18-20]:

$$\frac{\partial J_v}{\partial \mathbf{u}_v} = 2\mathbf{B}_v^T \tilde{\mathbf{Q}}_v (\Phi_{v/v-1} \hat{\mathbf{x}}_{v-1} + \mathbf{B}_v \mathbf{u}_v) + 2\mathbf{P}_v \mathbf{u}_v = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) представляет собой алгоритм, оптимальный по локальному критерию, и имеет вид [11, 13]:

$$\mathbf{u}_v = -\mathbf{L}_v \hat{\mathbf{x}}_{v,v-1},$$

в котором матричный коэффициент усиления \mathbf{L}_v определяется выражением

$$\mathbf{L}_v = (\mathbf{B}_v^T \tilde{\mathbf{Q}}_v \mathbf{B}_v + \mathbf{P}_v)^{-1} \mathbf{B}_v^T \tilde{\mathbf{Q}}_v \Phi_{v/v-1}.$$

Для получения алгоритма ОУ использованы справочные соотношения, которые приведены в [11, 13].

Моделирование и обсуждение результатов

Методами имитационного статистического моделирования были получены точностные характеристики ИСН применительно к задаче формирования управляемой траектории движения и проведен их анализ. Исследования параметров траекторного движения и точностных характеристик проводились на основе моделей движения ДУО и НС орбитальной группировки ГНСС. Моделировалась ситуация формирования траектории управляемого движения на основе решения задачи навигационно-временных определений в ИСН. В качестве исходных данных для моделирования использовались значения параметров, характеризующих функционирование ИСН, приведенные в [10, 12-17]. Рассчитывалась оценка навигационных параметров на основе алгоритма фильтрации в бортовой вычислительной системе, при исходных данных, в которых начальная точность задания координат определяется точностью инерциальной навигационной системы [10]. В качестве критерия точности принято СКО σ ошибки оценки соответствующего навигационно-временного параметра и



радиальная ошибка. На рис. 1 и 2 представлены графики ошибки оценивания координат X и Z при формировании траектории ДУО.

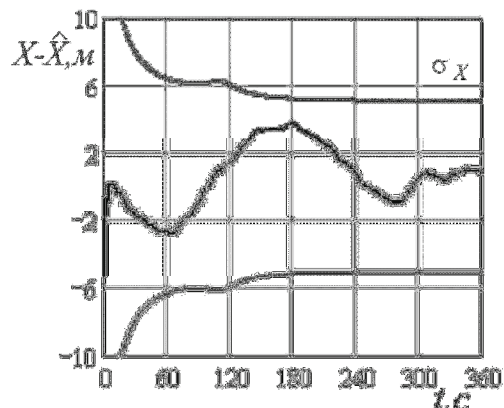


Рис. 1. Ошибка оценки координаты X в ИСН

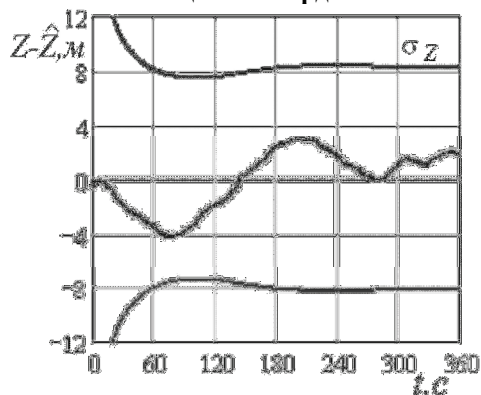


Рис. 2. Ошибка оценки координаты Z в ИСН

Анализ приведенных зависимостей и характеристик, полученных методом имитационного статистического моделирования, показывает, что погрешности определения параметров траекторного движения приводят к отклонению оценочных значений от истинных. Данное обстоятельство необходимо учитывать для обеспечения безопасности транспортных перевозок.

Выводы

Разработана модель траекторного движения динамического управляемого объекта на основе комплексной обработки информации в интегрированной системе навигации. Показано, что погрешности навигационных определений могут привести к отклонению оцениваемых параметров траекторного движения от истинных значений. Поэтому при формировании траектории необходимо учитывать погрешности оценки параметров траекторного движения на выходе интегрированной системы навигации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диль В.Ф., Сизых В.Н. Синтез оптимального управления воздушным судном на основе уравнений нелинейной динамики // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 03. С. 139–148.
2. Автоматизированные системы управления воздушным движением / Р.М. Ахмедов и др. // Новые информационные технологии в авиации. СПб.: Политехника, 2004. 446 с.
3. Maolaisha A. Free-Flight Trajectory Optimization by Mixed Integer Programming. A thesis submitted to fulfillment of the requirements for the degree of master in science. Angewandte Mathematik und Optimierung Schriftenreihe (AMOS) # 24. Uni-versity of Hamburg, 2015. 74 p.
4. Wickramasinghe N.K., Harada A. and Miyazawa Y. Flight trajectory optimization for an efficient air transportation system, Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012. Pp. 1–12.
5. Rub'en Ant'on Guijarro. Commercial aircraft trajectory optimization using optimal control. Bachelor Thesis, Universidad Carlos III de Madrid. 2015. pp 64.
6. Soler M., Olivares A., Staffetti E. Bonami P. Multiphase Mixed-Integer Optimal Control Approach to Aircraft Trajectory Optimization. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2013. № 36 (5). Pp. 1267–1277.
7. Toratani D. Study on Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence of Air Traffic Management. Doctoral Thesis. Yokohama National University. March, 2016. Pp. 101.
8. Воронов Е.М., Карпунин А.А. Обеспечение траекторной безопасности в задаче облета динамической круговой зоны // Наука и образование. 2011. № 12. С. 1–12. Электрон. науч.-техн. изд.
9. Воронов Е.М., Карпунин А.А. Обеспечение траекторной безопасности в задаче облета статичной круговой зоны // Вестник РУДН. Сер.: Инженерные исследования. 2012. № 1. С. 58–70.
10. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Г.И. Емельянец, А.П. Степанов. СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2016. 394 с.
11. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь, 1982. 392 с.
12. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
13. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов / М.С. Ярлыков и др. Т.1. Теоретические основы. М.: Радиотехника, 2012. 504 с.
14. Оценка эффективности типовой комплексной системы навигации / В.С. Марюхненко и др. // Полет. 2012. № 2. С. 25–35.
15. Марюхненко В.С. Системный анализ навигационного обеспечения подвижных транспортных объектов. Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2008. 80 с.
16. Марюхненко В.С. Оценка влияния геометрического фактора на точность и информативность позиционирования объекта в спутниковой радионавигационной системе // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 2. С. 30–40.



17. Capua R., Bottaro A., Implementation of the Unscented Kalman Filter and a Simple Augmentation System for GNSS SDR Receivers, Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012). Nashville. TN. 2012. September. Pp. 2398–2407.

REFERENCES

1. Dil' V.F., Sizykh V.N. Sintez optimal'nogo upravleniya vozdushnym sudnom na osnove uravnenii nelineinoi dinamiki [Synthesis of optimal control of an aircraft based on the equations of nonlinear dynamics]. Nauchnyi vestnik MGTU GA [Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation], 2017, Vol. 20, No. 03, pp. 139–148.
2. Akhmedov R.M. et al. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya vozdushnym dvizheniem [Automated air traffic control systems]. Novye informatsionnye tekhnologii v aviatsii [New Information Technologies in Aviation]. St. Petersburg: Politekhnik Publ., 2004, 446 p.
3. Maolaisha A. Free-Flight Trajectory Optimization by Mixed Integer Programming. A thesis submitted to fulfillment of the requirements for the degree of master in science. Angewandte Mathematik und Optimierung Schriftenreihe (AMOS) # 24. University of Hamburg, 2015, 74 p.
4. Wickramasinghe N.K., Harada A., Miyazawa Y. Flight trajectory optimization for an efficient air transportation system. Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012. pp. 1–12.
5. Rub'en Ant'on Gujarro. Commercial aircraft trajectory optimization using optimal control. Bachelor Thesis, Universidad Carlos III de Madrid, 2015, p. 64.
6. Soler M., Olivares A., Staffetti E., Bonami P. Multiphase Mixed-Integer Optimal Control Approach to Aircraft Trajectory Optimization. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2013. No. 36 (5) pp. 1267–1277.
7. Toratani D. Study on Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence of Air Traffic Management. Doctoral Thesis. Yokohama National University. March, 2016, pp. 101.
8. Voronov E.M., Karpunin A.A. Obespechenie traektornoi bezopasnosti v zadache obleta dinamicheskoi krugovoi zony [Providing path safety in the task of flying around a dynamic circular zone]. Nauka i obrazovanie [Nauka i Obrazovanie], 2011, No. 12, pp. 1–12. Electron. sci.-techn. Publ.
9. Voronov E.M., Karpunin A.A. Obespechenie traektornoi bezopasnosti v zadache obleta statichnoi krugovoi zony [Ensuring trajectory safety in the problem of flying around a static circular zone]. Vestnik RUDN. Ser.: Inzhenernye issledovaniya [RUDN Journal of Engineering Researches], 2012, No. 1, pp. 58–70.
10. Emel'yantsev G.I., Stepanov A.P. Integrirovannye inertzial'no-sputnikovye sistemy orientatsii i navigatsii [Integrated inertial-satellite systems of orientation and navigation]. St. Petersburg: Kontsern "TsNII "Elektropribor" Publ., 2016, 394 p.
11. Seidzh E.P., Uait Ch.S. Optimal'noe upravlenie sistemami [Optimum control of systems]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1982, 392 p.
12. Perov A.I., Kharisov V.N. (eds.). GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya [Principles of construction and operation]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p.
13. Yarlykov M.S. et al. Radioelektronnye kompleksy navigatsii, pritselivaniya i upravleniya vooruzheniem letatel'nykh apparatov. Vol.1. Teoreticheskie osnovy [Radio-electronic complexes for navigation, sighting and control of aircraft weapons]. Moscow: Radiotekhnika Publ, 2012, 504 p.
14. Maryukhnenko V.S. et al. Otsenka effektivnosti tipovoi kompleksnoi sistemy navigatsii [Evaluation of the efficiency of a typical integrated navigation system]. Polet [], 2012. No. 2, pp. 25–35.
15. Maryukhnenko V.S. Sistemnyi analiz navigatsionnogo obespecheniya podvizhnykh transportnykh ob'ektov [System analysis of navigation support for mobile transport facilities]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2008, 80 p.
16. Maryukhnenko V.S. Otsenka vliyaniya geometricheskogo faktora na tochnost' i informativnost' pozitsionirovaniya ob'ekta v sputnikovoi radionavigatsionnoi sisteme [Evaluation of the influence of the geometric factor on the accuracy and informative positioning of the object in the satellite radio navigation system]. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki [Achievements of Modern Radioelectronics], 2008, No. 2, pp. 30–40.
17. Capua R., Bottaro A., Implementation of the Unscented Kalman Filter and a Simple Augmentation System for GNSS SDR Receivers, Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012). Nashville. TN. 2012. September, pp. 2398–2407.

Информация об авторах

Пушкин Павел Юрьевич - к. т. н., доцент кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: p.pushk@mail.ru

Ерохин Вячеслав Владимирович - к. т. н., доцент кафедры «Авиационное радиоэлектронное оборудование», Иркутский филиал МГТУ ГА, г. Иркутск, e-mail: Ww_erohin@mail.ru

Для цитирования

Пушкин П. Ю. Моделирование траектории динамического управляемого объекта на основе комплексной обработки навигационной информации / П. Ю. Пушкин, В. В. Ерохин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2017. — Т. 56, № 4. — С. 183–188. — DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).183-188.

Authors

Pavel Yurievich Pushkin – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., the Subdepartment of Information Systems and Information Protection, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: p.pushk@mail.ru

Vyacheslav Vladimirovich Erokhin – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., the Subdepartment of Aviation Radioelectronic Equipment, Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, e-mail: Ww_erohin@mail.ru

For citation

Pushkin P. Yu., Erokhin V.V. Modelirovanie traektorii dinamicheskogo upravlyаемого ob'ekta na osnove kompleksnoi obrabotki navigatsionnoi informatsii [Modeling of the trajectory of a dynamic controlled object based on integrated processing of navigational information]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017, Vol. 56, No. 4, pp. 183–188. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).183-188.