

СИСТЕМЫ АВИАЦИОННОЙ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ И МЕТОДЫ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

УДК 621.396.94

DOI 10.51955/2312-1327_2024_1_113

УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЕЙ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ИСТОЧНИКОВ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

*Борис Валентинович Лежанкин,
orcid.org/0000-0001-5504-0884,
кандидат технических наук, доцент
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
lezhbor@mail.ru*

*Вячеслав Владимирович Ерохин,
orcid.org/0000-0002-5549-3952,
доктор технических наук
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
ww_erohin@mail.ru*

*Николай Павлович Малисов,
orcid.org/0000-0002-9398-2028,
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
malisovnik@mail.ru*

Аннотация. В реальных условиях применения для высокоточного позиционирования и управления траекторией беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при полете по маршруту проявляется недостаточная помехозащищенность и точность функционирования приемников спутниковых навигационных систем. В связи с этим актуальным является исследование возможных методов и средств обеспечения высокоточных навигационных определений, в том числе на основе комплексной обработки сигналов от различных источников навигационной информации при решении задачи вывода БПЛА в терминальное множество.

В статье представлены результаты разработки алгоритма управления траекторией БПЛА на основе методов статистической теории оптимального управления, реализация которого позволит повысить точность выдерживания заданного маршрута полета. Рассмотрены характеристики для анализа ошибок выдерживания траектории полета.

Приведены результаты моделирования и исследования характеристик алгоритма управления траекторией при различных конфигурациях источников навигационной

информации (ИНИ) и показана зависимость точности выдерживания заданного маршрута полета БПЛА от ошибок оценок навигационных параметров.

Ключевые слова: управление траекторией, беспилотный летательный аппарат, алгоритм Летова-Калмана, источники навигационной информации, автоматическое зависимое наблюдение.

CONTROL OF THE FLIGHT PATH OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH DIFFERENT CONFIGURATIONS OF NAVIGATION INFORMATION SOURCES

*Boris V. Lezhankin,
orcid.org/0000-0001-5504-0884,
Candidate of technical sciences
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),
3, Kommunarov
Irkutsk, 664047, Russia
lezhbor@mail.ru*

*Vyacheslav V. Erokhin,
orcid.org/0000-0002-5549-3952,
Doctor of Technical Science
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),
3, Kommunarov
Irkutsk, 664047, Russia
ww_erohin@mail.ru*

*Nikolay P. Malisov,
orcid.org/0000-0002-9398-2028,
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),
3, Kommunarov
Irkutsk, 664047, Russia
malisovnik@mail.ru*

Abstract. In real conditions of application for high-precision positioning and trajectory control of unmanned aerial vehicles (UAVs) when flying along a route, insufficient noise immunity and operating accuracy of satellite navigation system receivers are manifested. In this regard, it is relevant to study possible methods and means of providing high-precision navigation definitions based on complex processing of signals from various sources of navigation information when solving the problem of displaying a UAV in a terminal set.

The article presents the results of developing a UAV trajectory control algorithm based on methods of statistical optimal control theory, the implementation of which will improve the accuracy of maintaining a given flight route. The characteristics for analyzing errors in maintaining the flight path are considered.

The results of modeling and research of the characteristics of the trajectory control algorithm for various configurations of navigation information sources (NIS) are presented and the dependence of the accuracy of maintaining a given UAV flight route on errors in estimating navigation parameters is shown.

Keywords: trajectory control, unmanned aerial vehicle, Letov-Kalman algorithm, sources of navigation information, automatic dependent surveillance.

Введение

В контексте решения широкого круга задач, в частности, автономного картографирования, БПЛА должен реализовывать следующие функции: инициализировать операцию и выполнять взлет, осуществлять полет в назначенный пункт маршрута с высокой точностью при создании своей карты, выполнять оценку качества сгенерированной карты и реализовывать программу возврата в точку вылета. Для эффективного управления траекторией полета БПЛА на каждом этапе требуется высокоточное определение навигационных параметров [Гончаренко и др., 2019; Применение..., 2021; Формирование..., 2008; Huttunen, 2019]. Высокоточное определение параметров траекторного движения возможно обеспечить благодаря глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС). Системы траекторного управления современных БПЛА получают координатно-временную информацию от ГНСС. При этом применение ГНСС в качестве основного средства навигации ограничивают проблемы, которые возникают в реальных условиях эксплуатации. В частности, ГНСС не всегда может обеспечить выполнение требований по непрерывности и достоверности навигационно-временных определений [Скрыпник и др., 2020]. Также следует учесть, что ввиду большого удаления потребителей от навигационных космических аппаратов (НКА) уровень сигнала на входе приемника спутниковой навигации (ПСН) составляет всего 10–16 Вт, что значительно снижает помехозащищенность системы [Серебренников и др., 2017]. В-третьих, в последнее время актуальной проблемой стал спуфинг – преднамеренное внесение изменений в псевдодальность сигнала, поступающего от навигационного космического аппарата (НКА) [Арефьев и др., 2021; Пешехонов, 2022]. Кроме того, существует вероятность ограничения доступа Российских потребителей к возможности применения зарубежных ГНСС, что приведет к значительному уменьшению числа спутников рабочего созвездия и может сделать невозможным решение навигационной задачи на борту БПЛА, либо значительно ухудшить точность позиционирования. При этом погрешности позиционирования будут приводить к ошибкам выдерживания заданного маршрута полета.

В работе [Пешехонов, 2022] рассматриваются функциональные возможности навигационных систем, гипотетически способных дополнить или заменить ГНСС. В частности, комплексирование ГНСС и инерциальной навигационной систем в рамках построения интегрированной системы навигации (ИСН) позволит повысить точность позиционирования БПЛА [Емельянцева и др., 2016]. При управлении траекторией полета БПЛА требуется надежный прием сигналов источников навигационной информации (ИНИ) на всех этапах полета. В дополнение к спутниковой навигации может быть использована УКВ линия передачи данных на основе вещательного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В) для измерений псевдодальностей [Межетов и др., 2020]. При этом наземные станции (НС) системы представляют собой навигационные опорные точки (НОТ) [Шестаков и др., 2014].

Поэтому на данном этапе актуальными представляются исследования степени повышения точности позиционирования и выдерживания заданной траектории БПЛА при различных конфигурациях источников навигационной информации (ИНИ).

Цель работы – синтез алгоритма функционирования системы траекторного управления полетом БПЛА и исследование влияния конфигурации источников навигационной информации на точностные характеристики навигационного комплекса.

Структура ИСН и динамическая модель беспилотного летательного аппарата

Способом повышения позиционирования и выдерживания заданной траектории БПЛА является применение ИСН, состав которой представлен на рисунке 1. Определение параметров траектории БПЛА будет осуществляться на основе псевдодалномерных измерений до НОТ АЗН-В и НКА, что позволит увеличить число наблюдений при оценке переменных состояния [Оценка эффективности..., 2012].

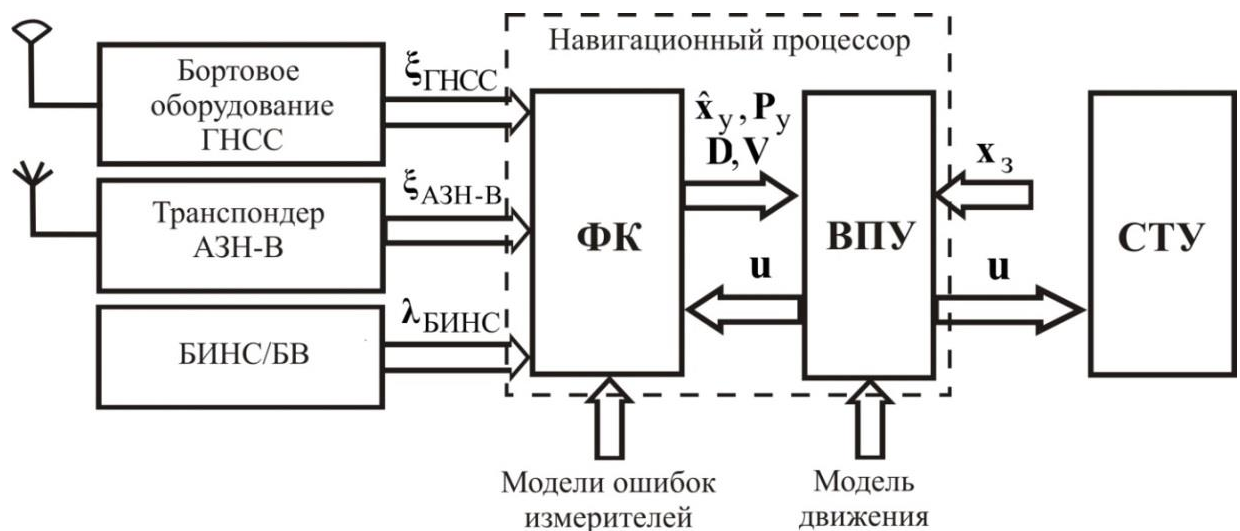


Рисунок 1 – Состав ИСН: СТУ – система траекторного управления; ФК – фильтр Калмана; ВПУ – вычислитель параметров управления

Принципы организации навигационных определений в ИСН для представленного варианта конфигурации ИНИ проиллюстрированы на рисунке 2.

Математическая модель, которая выражает полет БПЛА (рисунок 3), в работе представлена в виде системы [Воронов и др., 2011]:

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

где x и z – координаты БПЛА; ψ – угол поворота траектории; V – скорость; v_x и v_z – составляющие вектора скорости ветра; ω – угловая скорость; u – управление $|u| \leq 1$.

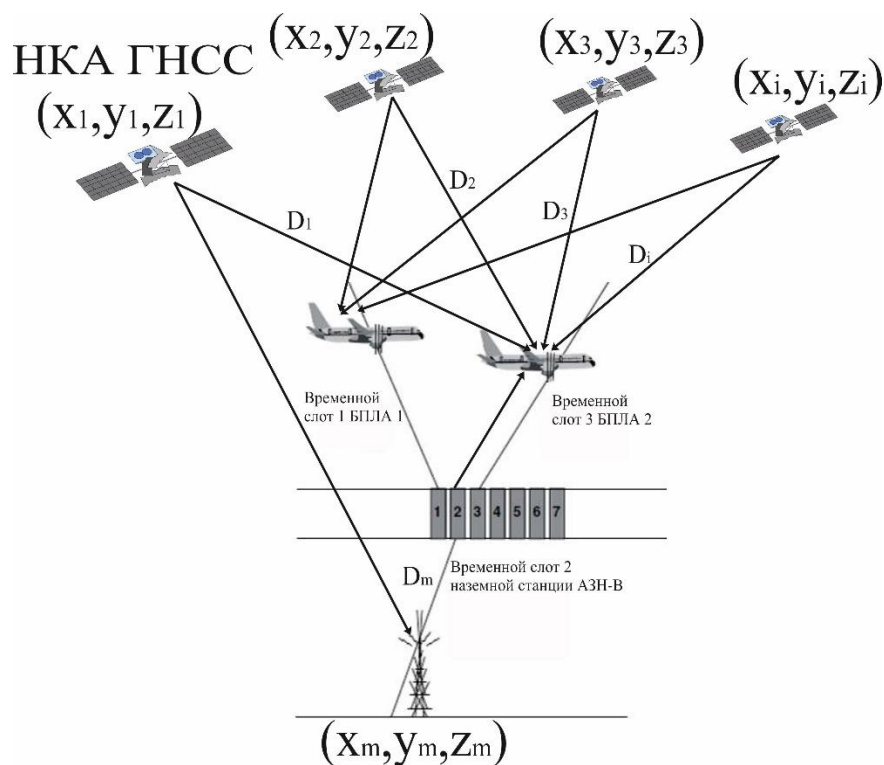


Рисунок 2 – Вариант конфигурации ИНИ и принцип обмена данным в АЗН-В с УКВ ЛПД режима 4

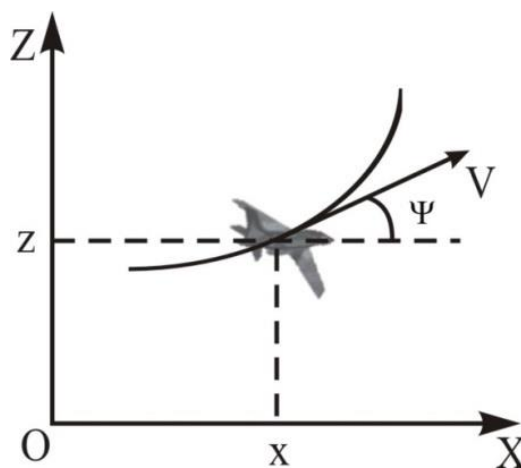


Рисунок 3 – Параметры траектории БПЛА

Постановка задачи

Фактический курс полета БПЛА вычисляются на основе текущих координат:

$$\psi = \arctg \left[\frac{y_i - (y + \Delta y)}{x_i - (x + \Delta x)} \cos \frac{x + \Delta x}{R} \right],$$

где x_i, y_i – координаты i -того пункта маршрута (ПМ); Δx и Δy – ошибки определения координат; R – радиус Земли.

Координатные ошибки Δx и Δy влияют на точность определения курса и выдерживания заданного маршрута полета. Поэтому модель измеренных навигационно-временных параметров (НВП) предлагается представить следующим образом:

$$\lambda_v = \mathbf{x}_v + \Delta \mathbf{x}_v, \quad (2)$$

где \mathbf{x} – вектор истинных значений, $\Delta \mathbf{x}$ – вектор погрешностей измерений.

Погрешности измерений подсистем объединим в единый вектор:

$$\bar{\lambda}_{ИССН}^i = \left[\bar{\lambda}_{ИНС}^i, \bar{\lambda}_{СРНС}^i, \bar{\lambda}_{АЗН}^i \right]^T \quad \Delta \mathbf{x} = \left[\Delta \mathbf{x}_{БИНС/БВ}, \Delta \mathbf{x}_{ГНСС}, \Delta \mathbf{x}_{АЗН-В} \right]^T, \quad (3)$$

где $\Delta \mathbf{x}_{БИНС/БВ}$ – вектор погрешностей измерения навигационных параметров БИНС и БВ; $\Delta \mathbf{x}_{ГНСС}$, $\Delta \mathbf{x}_{АЗН-В}$ – вектора погрешностей измерения навигационных параметров ПСН и транспондера АЗН-В.

Уравнение сообщения для вектора состояния (3) представим в виде:

$$\Delta \mathbf{x}_{v+1} = \Phi_{v+1/v} \Delta \mathbf{x}_v + \mathbf{G}_{v+1} \mathbf{w}_v, \quad (4)$$

где $\Phi_{v+1/v} \cong \mathbf{I} + \mathbf{F}_v dT + \dots$ – переходная матрица состояния системы на шаге T ; \mathbf{F} – матрица динамики; $dT = t_{v+1} - t_v$ – временной интервал; $\Delta \mathbf{x} = \left[\Delta x, \Delta V_x, \Delta y, \Delta V_y, \Delta z, \Delta V_z, \Delta D, \Delta \dot{D} \right]^T$ – вектор ошибок навигационных измерителей; \mathbf{G}_{v+1} – матрица, входных шумов \mathbf{w}_v с ковариациями \mathbf{Q}_v ; \mathbf{I} – единичная матрица;

Уравнение наблюдения можно представить в виде

$$\mathbf{z}_{v+1} = \mathbf{H}_{v+1/v} \Delta \mathbf{x}_v + \mathbf{n}_v, \quad (5)$$

где $\mathbf{z}_v = \left[z_{1,v}, \dots, z_{m,v} \right]^T$ – вектор измерений размерности ($m \times 8$), m – число ИНИ, $\mathbf{H}_{v+1/v}$ – матрица наблюдений ($m \times 8$); \mathbf{n}_v – m -мерный вектор ДБГШ с математическим ожиданием, равным 0, и известной матрицей дисперсий:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{l+1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_m^2 \end{bmatrix}.$$

Матрица наблюдений \mathbf{H} имеет следующий вид:

$$\mathbf{H}_{v+1/v} = \begin{bmatrix} \frac{x_{1,v} - x_v}{D_{1,v}} & 0 & \frac{y_{1,v} - y_v}{D_{1,v}} & 0 & \frac{z_{1,v} - z_v}{D_{1,v}} & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{l,v} - x_v}{D_{l,v}} & 0 & \frac{y_{l,v} - y_v}{D_{l,v}} & 0 & \frac{z_{l,v} - z_v}{D_{l,v}} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{x_{l+1,v} - x_v}{D_{l+1,v}} & 0 & \frac{y_{l+1,v} - y_v}{D_{l+1,v}} & 0 & \frac{z_{l+1,v} - z_v}{D_{l+1,v}} & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{m,v} - x_v}{D_{m,v}} & 0 & \frac{y_{m,v} - y_v}{D_{m,v}} & 0 & \frac{z_{m,v} - z_v}{D_{m,v}} & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

где $D_{i,v} = \sqrt{(x_{i,v} - x_v)^2 + (y_{i,v} - y_v)^2 + (z_{i,v} - z_v)^2}$ – дальность до i -того ИНИ (НКА и НС АЗН-В); x_i, y_i, z_i – координаты i -того ИНИ; x, y, z – координаты БПЛА.

Применительно к уравнениям сообщения и измерения получен реализуемый в навигационном процессоре алгоритм оценивания, который подробно изложен в [Ерохин и др., 2023]. На основе выходных данных ИСН λ_v и ФК $\Delta \hat{\mathbf{x}}_v$ определяется оценка вектора параметров траекторного движения БПЛА

$$\hat{\mathbf{x}}_v = \lambda_v - \Delta \hat{\mathbf{x}}_v,$$

которая поступает в ВПУ для формирования сигналов управления.

Синтез алгоритма управления

В данной статье рассматривается задача синтеза алгоритма управления траекторией полета БПЛА по заданной программной траектории в определенную область пространства (терминальное множество), которая формулируется следующим образом. Для ИСН, состояние которой аппроксимируется моделью (4) при наличии измерений (5), необходимо найти

вектор сигналов управления \mathbf{u} , оптимальный по минимуму функционала качества Летова-Калмана. Ввиду нелинейностей в модели измерений теорема разделения, выводы которой указывают на возможность по отдельности разрабатывать подсистему оценки параметров траекторного движения и подсистему управления (оптимальный регулятор), справедлива приближенно, в том числе для задачи дискретного управления [Меркулов и др., 2018; Свидетельство..., 2016]. В работе используется локальный функционал качества для синтеза алгоритма оптимального управления:

$$J = \min_{\mathbf{u}_1^{T-1}} M \left[\sum_{v=1}^T \mathbf{x}_v^T \tilde{\mathbf{Q}}_v \mathbf{x}_v + \mathbf{u}_v^T \mathbf{P}_v \mathbf{u}_v \right] = \min_{\mathbf{u}_1^{T-1}} M \left[\sum_{v=1}^T c_v(\mathbf{x}_v, \mathbf{u}_v) \right],$$

где $\tilde{\mathbf{Q}}_v = \begin{vmatrix} \mathbf{Q}_v & -\mathbf{Q}_v \\ -\mathbf{Q}_v & \mathbf{Q}_v \end{vmatrix}$.

Для сокращения записи введен обобщенный вектор $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_z, \mathbf{x}_y)^T$, включающий вектор заданных переменных состояния \mathbf{x}_z и вектор управляемых координат \mathbf{x}_y , и запишем уравнение [Меркулов и др., 2018]:

$$\mathbf{x}_{v+1} = \Phi_{v/v+1} \mathbf{x}_v + \mathbf{B}_v \mathbf{u}_v + \mathbf{G}_{v/v+1} \mathbf{n}_{x,v},$$

где \mathbf{B}_v – матрица эффективности управления,

$$\Phi = \begin{vmatrix} \Phi_z & 0 \\ 0 & \Phi_y \end{vmatrix}, \mathbf{G} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_y \end{vmatrix}, \mathbf{B} = \begin{vmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_y \end{vmatrix}, \mathbf{n} = \begin{vmatrix} 0 \\ \mathbf{n}_y \end{vmatrix}.$$

Решающее правило алгоритма управления $\mathbf{u}_v = \mathbf{u}_v(\xi_1^{v-1})$ представим в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_v &= \arg \min_{\mathbf{u}_v \in \mathbf{U}} J_v = \arg \min_{\mathbf{u}_v \in \mathbf{U}} \left\{ \int_{\mathbf{x}} c_v(\mathbf{x}_v, \mathbf{u}_v(\xi_1^{v-1})) p(\mathbf{x}_v | \xi_1^{v-1}) d\mathbf{x}_v \right\} = \\ &= \arg \min_{\mathbf{u}_v \in \mathbf{U}} M \left\{ c_v(\mathbf{x}_v, \mathbf{u}_v) \Big|_{\xi_1^{v-1}} \right\}. \end{aligned}$$

При этом [Меркулов и др., 2018]:

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

где tr – след матрицы.

Используя дискретные уравнения Беллмана, можно получить алгоритм оптимального дискретного управления [Меркулов и др., 2018]:

$$\mathbf{u}_{v-1} = -\mathbf{R}_{v-1} \tilde{\mathbf{x}}_{v-1}, \quad (6)$$

где $\mathbf{R}_{v-1} = [\mathbf{K}_v + \mathbf{B}_{v-1}^T \mathbf{P}_v \mathbf{B}_{v-1}]^{-1} \mathbf{B}_{v-1}^T \mathbf{P}_v \Phi_{v/v-1}$; $\tilde{\mathbf{x}}_v = \Phi_{v/v-1} \hat{\mathbf{x}}_{v-1} + \mathbf{B}_{v-1} \hat{\mathbf{u}}_{v-1}$; \mathbf{P}_v – матрица, удовлетворяющая уравнению $\mathbf{P}_{v-1} = \Phi_{v/v-1}^T \mathbf{P}_v \Phi_{v/v-1} - \mathbf{L}_{v-1}^T [\mathbf{K}_v + \mathbf{B}_{v-1}^T \mathbf{P}_v \mathbf{B}_{v-1}] \mathbf{L}_{v-1}$ с граничным условием $\mathbf{P}_r = \mathbf{Q}_1$.

Оптимальный алгоритм в постановке Летова-Калмана запишем в виде [Меркулов и др., 2018]:

$$\mathbf{u}_v = (\mathbf{B}_v^T \tilde{\mathbf{Q}}_v \mathbf{B}_v + \mathbf{P}_v)^{-1} \mathbf{B}_v^T \tilde{\mathbf{Q}}_v [\Phi_{3,v/v-1} \hat{\mathbf{x}}_{3,v-1} - \Phi_{y,v/v-1} \hat{\mathbf{x}}_{y,v-1}] = \mathbf{L}_v [\hat{\mathbf{x}}_{3,v-1} - \hat{\mathbf{x}}_{y,v-1}] \quad (7)$$

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

В соответствии с введенным обозначением (9) вектор сигналов управления представим в виде:

$$\mathbf{u}_v = -(\mathbf{B}_v^T \mathbf{Q}_v \mathbf{B}_v + \mathbf{P}_v)^{-1} \mathbf{B}_v^T \mathbf{Q}_v \Phi_{v/v-1} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{v-1} = -\mathbf{L}_v (\mathbf{x}_{3,v-1} - \hat{\mathbf{x}}_{y,v-1}). \quad (8)$$

Конкретизируем уравнение (6) применительно к полету БПЛА по заданному маршруту в виде:

$$u_v = l_v (\psi_{3,v-1} - \hat{\psi}_{y,v-1}).$$

Дисперсия ошибки определения курса рассчитывается по формуле:

$$D_\psi = \frac{1}{V} \sum_{v=0}^{N-1} (\psi_{3,v} - \hat{\psi}_{y,v})^2, \quad (9)$$

где $\hat{\psi}_{y,v}$ – оценка текущего значения курса полета БПЛА.

Структурная схема системы управления траекторией БПЛА и системы оценки параметров траекторного движения приведена на рисунке 4.

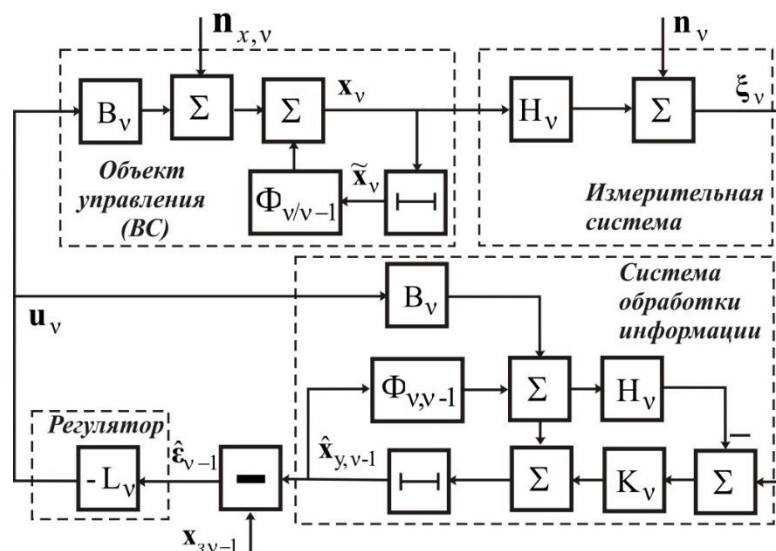


Рисунок 4 – Схема системы управления траекторией БПЛА и системы оценки параметров траекторного движения

Таким образом, реализация алгоритма Летова-Калмана формирует сигналы управления, которые определяются текущей ошибкой $\hat{\epsilon}_{v-1} = x_{3,v-1} - \hat{x}_{y,v-1}$, что позволяет уменьшить отклонение фактической траектории от заданной.

Результаты моделирования

В процессе исследования процессов управления траекторией полета БРЛА моделировалось 6 различных конфигураций ИНИ:

- 1) в процессе полета управление траекторией БПЛА реализуется на основе 4 НКА ГНСС;
- 2) управление траекторией реализуется на основе 3 НС ГНСС;
- 3) управление траекторией реализуется на основе 2 НКА ГНСС;
- 4) управление траекторией реализуется на основе 3 НКА ГНСС и 1 НС АЗН-В;
- 5) управление траекторией реализуется на основе 2 НКА ГНСС и 1 НС АЗН-В;
- 6) управление траекторией реализуется на основе 2 НКА ГНСС и 2 НС АЗН-В. Следует отметить, что при моделировании алгоритма управления траекторией во всех 6 конфигурациях для оценки параметров траекторного движения использовалась выходная информация БИНС. Исходные данные для моделирования приведены в [Ерохин и др., 2023].

Зависимости значений курса БПЛА от конфигурации ИНИ представлены на рис. 5: кривая 1 – оценка курса при 1 конфигурации, кривая 2 – оценка курса при 2 конфигурации; оценка курса при 3 конфигурации; ψ_3 – заданный курс полета. На рис. 6 приведены зависимости значений дисперсии

ошибки курса БПЛА: кривая 1 соответствует 1 конфигурации, кривая 2 – 2 конфигурации; кривая 2 – 2 конфигурации.

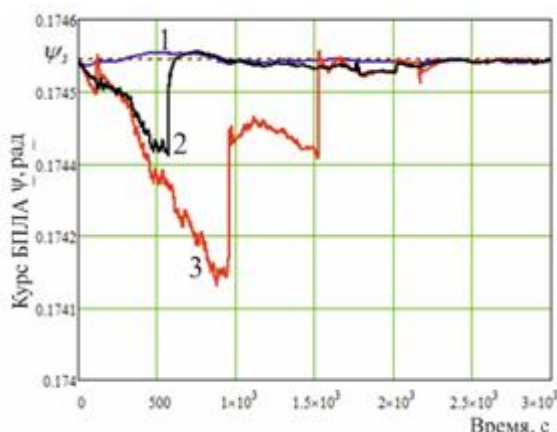


Рисунок 5 – Значения курса ВС для конфигураций 1-3

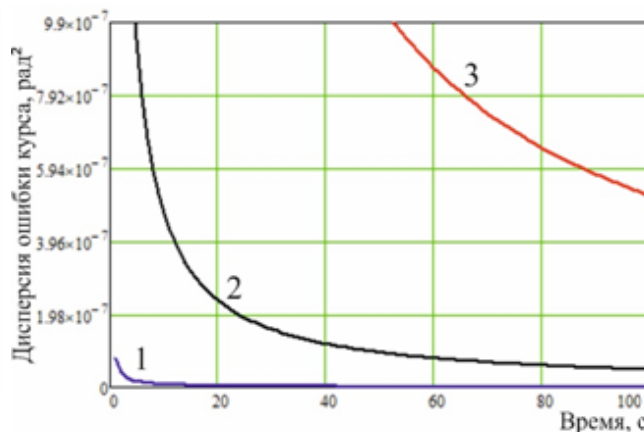


Рисунок 6 – Дисперсия ошибка оценки курса полета для конфигураций 1-3

Анализ результатов, показанных на рисунках 5-6, показывает, что при наличии на входе алгоритма количества сигналов равного или большего минимально необходимого для решения навигационной задачи числа ИНИ (4 и более НКА) обеспечивается высокая точность определения курса БПЛА. Уменьшение количества псевдодальномерных измерений до ИНИ приводит к снижению точности оценки курса полета БПЛА. При этом сохраняется непрерывность выдерживания заданного курса полета при использовании в алгоритме выходной информации БИНС.

Для повышения эффективности алгоритма управления траекторией предлагается использовать данные от НС АЗН-В, что приводит к расширению вектора псевдодальномерных измерений. На рис. 7, 8 приведены графики зависимости курса полета БПЛА от конфигурации ИНИ и дисперсии ошибки курса для 4-ой и 5-ой конфигурации ИНИ.

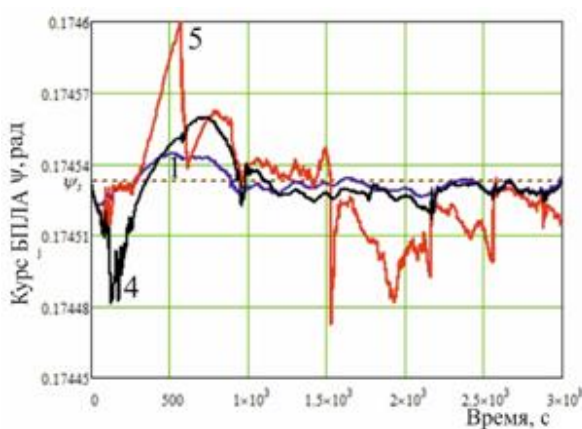


Рисунок 7 – Динамика значений курса БПЛА для конфигураций 1, 4, 5

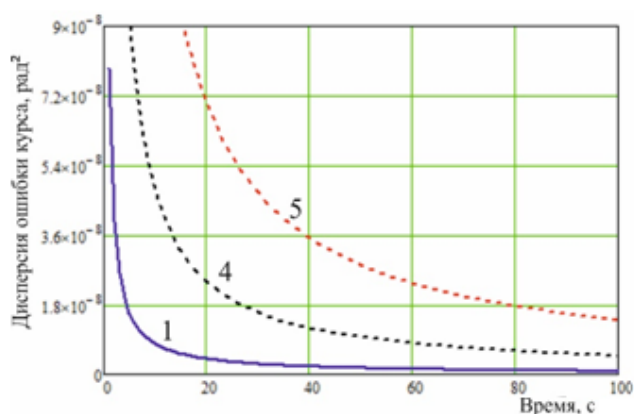


Рисунок 8 – Дисперсия ошибка оценки курса полета для конфигураций 1, 4, 5

На рисунке 9 представлены расчетные значения дисперсии ошибки определения курса для всех моделируемых конфигураций ИНИ: непрерывными линиями показаны графики ошибки при работе только по НКА ГНСС, пунктирными линиями обозначены графики дисперсии при использовании сигналов НС АЗН-В.

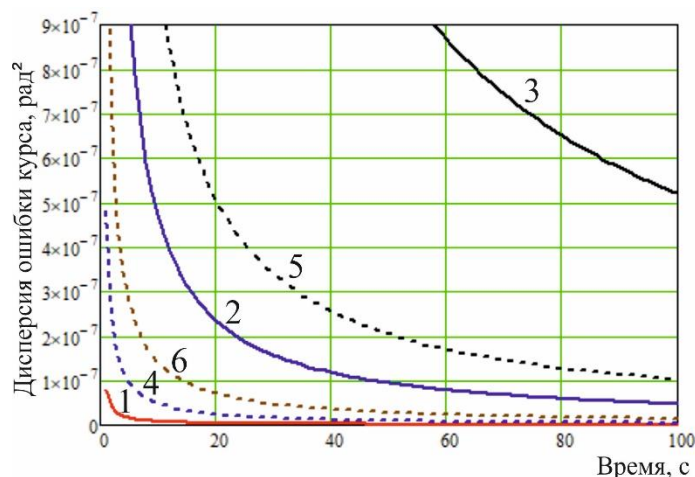


Рисунок 9 – Дисперсии ошибок оценки курса полета для конфигураций 1, 4, 5

Анализ результатов моделирования и исследований показывает, что расширение вектора псевдодалномерных измерений в рамках комплексной обработки информации при управлении траекторией полета БПЛА позволяет и уменьшить отклонение фактической траектории от заданной. В частности, сравнение графиков 3 и 6 на рис. 9 показывает, что при использовании сигнала НС АЗН-В в дополнение к 2 НКА ГНСС позволяет уменьшить дисперсию погрешности измерения курса полета БПЛА на порядок.

Заключение

ГНСС обладают глобальностью рабочей зоны и номинально высокой точностью позиционирования, однако в силу низкой помехоустойчивости необходимы навигационные средства, дополняющие ГНСС. Пока невозможно полное замещение ГНСС, но исследование вариаций набора средств для конкретных условий применения представляет определенный научно-прикладной интерес. В качестве помехоустойчивой системы обмена данными представляется рациональным применение АЗН-В, т.к. показатель помехозащищенности за счет выбранной структуры сигнала и большего отношения сигнал/шум у АЗН-В в реальных условиях выше, чем у ГНСС. В статье представлены алгоритм управления траекторией полета БПЛА на основе комплексной обработки навигационной информации и результаты исследований влияния конфигурации источников навигационной информации на точностные характеристики системы. Показана возможность повышения качества решения задачи управления траекторией полета БПЛА за счет комплексной оценки параметров траекторного движения.

Библиографический список

- Арефьев Р. О.* Применение помехоустойчивого кодирования при обработке сообщений локальной корректирующей станции / Р. О. Арефьев, С. В. Туринцев, М. С. Туринцева // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Иркутск, 14–15 октября 2021 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2021. С. 22–32. EDN YMDPPC.
- Воронов Е. М.* 77-30569/280873 Обеспечение траекторной безопасности в задаче облета динамической круговой зоны / Е. М. Воронов, А. А. Карпунин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 12. С. 5. EDN OOOZGRX.
- Гончаренко В. И.* Задача оперативной двумерной маршрутизации группового полета беспилотных летательных аппаратов / В. И. Гончаренко, Г. Н. Лебедев, Д. А. Михайлин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 1. С. 153–165. DOI 10.1134/S0002338819010074. EDN YWYDVB.
- Емельянцев Г. И.* Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Г. И. Емельянцев, А. П. Степанов; Под общей редакцией В. Г. Пешехонова. Государственный Центр Российской Федерации АО «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор» национальный исследовательский университет ИТМО. Санкт-Петербург: Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2016. 394 с. EDN XSSBEF.
- Ерохин В. В.* Оценка параметров траекторного движения БПЛА при различной конфигурации источников навигационной информации / В. В. Ерохин, Б. В. Лежанкин, Э. А. Болелов // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. Т. 77, № 6. С. 35–49. DOI 10.18127/j20700784-202306-04. EDN MVHGGW.
- Межетов М. А.* Перспективы использования системы передачи данных LDACS для задач управления воздушным движением / М. А. Межетов, Е. С. Григорьева, П. Т. Никитич // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, Иркутск, 15–22 октября 2020 года. Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2020. С. 176–182. EDN GFCDDC.
- Меркулов В. И.* Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Теоретические основы. РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса / В. И. Меркулов, В. С. Вербя, А. Р. Ильчук. М.: Радиотехника, 2018. 320 с.
- Оценка эффективности типовой авиационной комплексной системы навигации / В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад, Е. И. Антипин, С. В. Туринцев // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2012. № 2. С. 25–35. EDN OYXKML.
- Пешехонов В. Г.* Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 1(116). С. 3–11. DOI 10.17285/0869-7035.0084. EDN WRZXAM.
- Применение технологии LoRa в беспилотных авиационных системах / М. А. Межетов, А. И. Тихова, У. С. Вахрушева, А. В. Федоров // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Иркутск, 14–15 октября 2021 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2021. С. 180–185. EDN UZUCLT.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617951 Российская Федерация. Расчет характеристик навигационного сеанса системы ГЛОНАСС:

№ 2016615402: заявл. 26.05.2016: опубл. 19.07.2016 / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев, Н. Г. Арефьева. EDN JODKFFV.

Серебренников Е. А. Программная модель линии цифровой связи VDL режима 2 / Е. А. Серебренников, С. В. Туринцев // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2017. Т. 2, № 13. С. 119-121. EDN YQWFIF.

Скрыпник О. Н. Оптимизация траектории мобильного псевдоспутника для повышения точности интегрированного навигационно-временного поля ГЛОНАСС / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев // *Современные наукоемкие технологии*. 2020. № 2. С. 51-58. DOI 10.17513/snt.37914. EDN KZCVNA.

Формирование радиолокационной карты подстилающей поверхности путем фильтрации случайных полей / О. Н. Скрыпник, Б. В. Лежанкин, Б. М. Миронов, Н. П. Малисов // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2008. № 133. С. 60-66. EDN KVVEYT.

Шестаков И. Н. Расширение поля СРНС с помощью наземных станций АЗН-В / И. Н. Шестаков, Г. А. Крыжановский // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2014. № 210. С. 114-117. EDN TBUBMV.

Huttunen M. Civil unmanned aircraft systems and security: The European approach // *J Transp Secur*. 2019. № 12. P. 83-101. DOI 10.1007/s12198-019-00203-0.

References

- Arefyev R. O., Turintsev S. V., Turintseva M. S.* (2021). The use of noise-resistant coding in the processing of messages from a local correction station. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoj aviacii : sbornik trudov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Irkutsk: Irkutskij filial federal'nogo gosudarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya «Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet grazhdanskoj aviacii». pp. 22-32. EDN YMDPPC. (in Russian)
- Erokhin V. V., Lezhankin B. V., Bolelov E. A.* (2023). Estimation of UAV trajectory parameters with different configuration of navigation information sources. *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki-Peterburg: Konzern "Central'nyj nauchno-issledovatel'skij institut "Elektropribor"*. 77(6): 35-49. DOI 10.18127/j20700784-202306-04. EDN MVHGGW. (in Russian)
- Goncharenko V. I., Lebedev G. N., Mikhaylin D. A.* (2019). The task of operational two-dimensional routing of a group flight of unmanned aerial vehicles. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*. 1: 153-165. DOI 10.1134/S0002338819010074. EDN YWYDVB. (in Russian)
- Huttunen M.* (2019). Civil unmanned aircraft systems and security: The European approach. *J Transp Secur*. 12: 83–101. DOI 10.1007/s12198-019-00203-0.
- Maryukhnenko V. S., Mukhopad Yu. F., Antipin E. I., Turintsev S. V.* (2012). Evaluation of the effectiveness of a typical aviation integrated navigation system. *Polet. Obshcherossijskij nauchno-tekhnicheskij zhurnal*. 2: 25-35. EDN OYXKML. (in Russian)
- Merkulov V. I., Verba V. S., Ilchuk A. R.* (2018). Automatic tracking of targets in the radar of integrated aviation complexes. Theoretical foundations. Radar as part of an integrated aviation complex. Moscow: *Radiotekhnika*, 2018. 320 p. (in Russian)
- Mezhetov M. A., Grigorieva E. S., Nikitich P. T.* (2020). Prospects for using the LDACS data transmission system for air traffic control tasks *Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Irkutsk, 15–22 oktyabrya 2020 goda*. Irkutsk: Irkutskij filial federal'nogo gosudarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet grazhdanskoj aviacii". pp. 176-182. EDN GFCDDC. (in Russian)
- Mezhetov M. A., Tikhova A. I., Vakhrusheva U. S., Fedorov A. V.* (2021). Application of LoRa technology in unmanned aircraft systems. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoj aviacii : sbornik trudov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*.

- Irkutsk: Irkutskij filial federal'nogo gosudarstvennogo byudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya «Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet grazhdanskoj aviacii». 2: 180-185. EDN UZUCLT. (in Russian)
- Peshekhonov V. G.* (2022). High-precision navigation without using information from global navigation satellite systems. *Giroskopiya i navigaciya*. 1(116): 3-11. DOI 10.17285/0869-7035.0084. EDN WRZXAM. (in Russian)
- Serebrennikov E. A., Turintsev S. V.* (2017). Software model of the VDL digital communication line of mode 2. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki*. 13: 119-121. (in Russian)
- Shestakov I. N., Kryzhanovsky G. A.* (2014). Expansion of the SRNS field with the help of AZN-V ground stations. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviacii*. 210: 114-117. EDN TBUBMV. (in Russian)
- Skrypnik O. N., Arefyev R. O.* (2020). Optimization of the trajectory of a mobile pseudo-satellite to improve the accuracy of the integrated GLONASS navigation and time field. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2: 51-58. DOI 10.17513/snt.37914. EDN KZCVNA. (in Russian)
- Skrypnik O. N., Arefyev R. O., Arefyeva N. G.* (2016). Calculation of the characteristics of the navigation session of the GLONASS system. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2016617951 Rossijskaya Federaciya*. EDN JODKfV. (in Russian)
- Skrypnik O. N., Lezhankin B. V., Mironov B. M., Malisov N. P.* (2008). Formation of a radar map of the underlying surface by filtering random fields. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviacii*. 133: 60-66. EDN KVVEYT. (in Russian)
- Voronov E. M., Karpunin A. A.* (2011). 77-30569/280873 Ensuring trajectory safety in the task of overflying a dynamic circular zone. *Elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie «Nauka i obrazovanie»*. 12: 5. (in Russian)
- Yemelyantsev G. I., Stepanov A. P.* (2016). Integrated inertial-satellite orientation and navigation systems. Saint Petersburg: *Koncern «Central'nyj nauchno-issledovatel'skij institut «Elektropribor»*. 2016. 394 p. EDN XSSBEF. (in Russian)