УДК 629.05

К.К. Васильев, Л.Ю. Королев

ОЦЕНИВАНИЕ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ КООРДИНАТ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ АППАРАТОВ

Васильев Константин Константинович, доктор технических наук, окончил радиотехнический факультет Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина), профессор кафедры «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета, заслуженный деятель науки и техники РФ, член-корреспондент АН республики Татарстан. Имеет монографии, учебные пособия и статьи в области статистического синтеза и анализа информационных систем. [e-mail: vkk@ulstu.ru].

Королев Леонид Юрьевич, окончил Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, аспирант кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» МГУ им. Н.П. Огарёва. Имеет статьи в области навигации беспилотных летательных аппаратов. [e-mail: l.y.korolev@yandex.ru].

Аннотация

Решена задача комплексирования оценок собственных и взаимных координат разной точности для произвольного числа автономных аппаратов с учетом воздействия внешних возмущений разной интенсивности. Рассмотрена возможность комплексирования навигационных параметров летательных аппаратов двумя способами. В первом алгоритме применен векторный линейный фильтр Калмана для повышения точности динамически изменяющихся координат группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Второй метод заключается в динамическом оценивании с помощью квазиоптимальной двухэтапной процедуры, включающей статическую оценку координат и фильтр Калмана. Получены выражения для определения ковариационных матриц ошибок комплексирования двумя методами. Проведено сравнение эффективности методов оценивания навигационных параметров группы БПЛА при разных начальных условиях в общем виде и для случая применения существующих систем навигации. Приведены результаты сравнительного анализа эффективности двух рассмотренных подходов.

Ключевые слова: комплексирование оценок, координаты аппаратов, модель наблюдений, стохастическое уравнение состояния, фильтр Калмана, ковариации ошибок.

doi:

ESTIMATION OF VARYING COORDINATES OF THE GROUP OF AUTONOMOUS VEHICLES

Konstantin Konstantinovich Vasilev, Doctor of Science in Engineering, Professor of the Department of Telecommunications at Ulyanovsk State Technical University, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; graduated from the Radioengineering Faculty of Leningrad Electrotechnical Institute; an author of monographs, manuals and articles in the field of statistical synthesis and the analysis of information systems. e-mail: vkk@ulstu.ru.

Leonid Iurevich Korolev, graduated from Ogarev Mordovia State University; Postgraduate Student of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems of Ogarev Mordovia State University; an author of articles in the field of navigation of unmanned aerial vehicles. e-mail: l.y.korolev@yandex.ru.

Abstract

The problem of integrating the estimation of own and mutual coordinates of different accuracy for an arbitrary number of independent devices considering impact of external indignations of different intensity is solved. The integration possibility of aircraft navigation parameters is considered in two ways. The first algorithm uses the vector linear Kalman filter to increase the accuracy of the dynamically changed coordinates of the group of unmanned aerial vehicles. The second method consists in dynamic estimating using the quasioptimum two-stage procedure that includes static assessment of coordinates and Kalman filtering. Expressions for detecting the covariation matrixes of integration errors are obtained by two methods. The efficiency of methods for estimating the navigation parameters of the group of unmanned aerial vehicles is compared under different initial conditions in a generic form and for the application case of the existing navigation systems. The results of comparative analysis of efficiency of two considered approaches are given.

Key words: estimation integration, vehicle coordinates, model of observations, stochastic equation of a state, Kalman filter, covariances of mistakes.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все больший интерес привлекает групповое применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Совершенствование систем управления, повышение энергоэффективности позволяют увеличить время и дальность полета, а также грузоподъемность летательного аппарата для размещения оборудования при выполнении специализированных задач. Групповое применение БПЛА позволяет повысить надежность выполнения миссии. Кроме того, использование нескольких летательных аппаратов значительно сокращает время выполнения задачи, например картографирования местности, патрулирования территории, действий при чрезвычайных ситуациях.

При групповом применении БПЛА необходимо учитывать особенности навигации и управления строем. Важнейшей задачей является снижение погрешностей определения местоположения. В работе [1] рассмотрен вопрос формирования строя в группе БПЛА для более точного выполнения поставленной задачи. В [2] описываются способы взаимодействия группы БПЛА с наземным пунктом управления. Такой подход повышает управляемость системы, но сокращает дальность действия, исключает автономность, необходимую при выполнении задач в зонах труднодоступности радиосигналов, например в шахтах, ущельях, тоннелях.

В случае отсутствия радиосигналов становится невозможным использовать глобальные спутниковые системы навигации GPS или ГЛОНАСС. Тогда для повышения точности навигации можно применить технологию одновременной локализации и картографирования SLAM или систему навигации на основе маркеров [3,4]. Кроме того, снижение ошибки определения координат автономных аппаратов достигается при использовании в качестве ориентиров местных неподвижных объектов [5]. Повысить точность движения группы БПЛА по марш-

руту возможно при помощи взаимодействия аппаратов по фиксированному каналу связи [6, 7].

Расширение областей задач для автономных систем, в частности для группового использования БПЛА, требует постоянного развития как аппаратной, так и программной частей комплекса. Для повышения точности местоопределения группы БПЛА необходимо прибегать к совместной обработке навигационных параметров из разных источников данных. В работах [8–10] рассмотрены вопросы комплексирования данных при одноразовых измерениях собственных и взаимных координат. Вместе с тем, задачи одновременного динамического объединения собственных и взаимных оценок изменяющихся координат произвольного числа аппаратов изучены не в полной мере. В настоящей работе предложено два подхода к решению таких задач и приведены результаты сравнительного анализа их эффективности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим алгоритмы оценивания координат $\bar{x}_{li} = (x_{li} \ v_{xli} \ y_{li} \ v_{yli} \ z_{li} \ v_{zli})$ группы M БПЛА, где x_{li} , y_{li} , z_{li} – декартовы координаты положения l -го ($l=1, 2, \dots, M$) БПЛА в момент времени t_i ; v_{xli} , v_{yli} , v_{zli} – проекции скорости на координатные оси. Для оценки координат могут использоваться как автономные датчики, например, инерциальные системы или GPS, так и измерения взаимных расстояний и пеленгов. Будем предполагать, что такие наблюдения пересчитываются в измерения разностей всех $\bar{x}_{li} - \bar{x}_{ki}$ или части декартовых координат l -го и k -го БПЛА. Например, на основе лазерного или акустического датчика могут быть определены дальность, пеленг и угол места k -го БПЛА по отношению к l -му. После пересчета взаимного положения в декартовы координаты получим оценки разностей $x_{li} - x_{ki}$, $y_{li} - y_{ki}$, $z_{li} - z_{ki}$.

Рис. 1. Блок-схемы алгоритмов оценивания координат с помощью векторного фильтра Калмана (а) и путем скалярного оценивания после статического комплексирования (б)

Будем считать, что комплексирование производится отдельно при оценивании координат x_{li} , y_{li} , z_{li} $l=1, 2, \dots, M$. Это справедливо, если полагать, что ошибки измерения координат и их разностей некоррелированы. В этом случае достаточно рассмотреть решение задачи для наблюдений координат и их разностей по координате X . Для осей Y и Z все алгоритмы повторяются с точностью до обозначений. Будем обозначать номер БПЛА верхним индексом для координаты, наблюдений, оценок, матриц и других переменных.

Рассмотрим возможности оптимальной оценки изменяющихся навигационных параметров M аппаратов с помощью векторной калмановской фильтрации, блок-схема которой представлена на рисунке 1а, и квазиоптимального раздельного оценивания положения каждого аппарата после совместной статической коррекции координат (рис. 1б).

Получив навигационные данные от систем определения координат, формируется наблюдение собственных z_i^l и взаимных z_i^{kl} координат. Затем в первом случае осуществляется фильтрация параметров с применением вектора прогноза $\hat{x}_{\mathcal{G}i}$, на выходе фильтра Калмана получаем вектор оптимальных оценок координат $\hat{x}_i$. В случае квазиоптимальной двухэтапной процедуры после оценки собственных и взаимных координат производится статическое комплексирование с применением оптимальных коэффициентов. После чего выделяются координаты каждого БПЛА из вектора состояний ($\tilde{x}_l$). Набор параметров для каждого БПЛА проходит процедуру калмановской фильтрации с применением прогнозирования $\hat{x}_{\mathcal{G}i}^1 \dots \hat{x}_{\mathcal{G}i}^l \dots \hat{x}_{\mathcal{G}i}^M$. На выходе фильтров получаем оптимальные значения оценок координаты и скорости для каждого из M БПЛА.

Проанализируем эффективность каждого из методов с помощью математического моделирования и сравним показатели точности оценивания при различных начальных условиях.

Метод 1. Векторный фильтр Калмана

Наблюдения за координатами группы из M БПЛА, движущихся строем, включают измерения собственных $z_i^l = x_i^l + n_i^l$, $l=1, 2, \dots, M$, $i=1, 2, \dots$ и взаимных $z_i^{kl} = (x_i^k - x_i^l) + n_i^{kl}$, $k, l=1, 2, \dots, k \neq l$, координат, где n_i^l , n_i^{kl} – независимые гауссовские погрешности наблюдений с нулевыми средними и заданными ковариационными матрицами. Наблюдения z_i^l выполняются с помощью автономных датчиков с дисперсией погрешности измерений $\sigma_{ii}^{2(l)}$, а наблюдения z_i^{kl} производятся с помощью датчиков взаимных расстояний и пеленгов, имеющих дисперсию погрешности измерений $\sigma_{kli}^{2(kl)}$.

Объединим все наблюдения в вектор $\bar{z}_i = (z_i^1 \ z_i^{12} \dots \ z_i^{1M} \ z_i^{21} \ z_i^{22} \dots \ z_i^{2M} \dots \ z_i^{M1} \ z_i^{M2} \dots \ z_i^M)^T$ и воспользуемся стандартной формой записи модели наблюдений:

$$\bar{z}_i = C\bar{x}_i + \bar{n}_i, \quad (1)$$

где $C = (M^2 \times 2M)$ -матрица, определяющая все или часть наблюдаемых компонент вектора состояния M аппаратов $\bar{x}_i = (x_i^1 \ v_{xi}^1 \ x_i^2 \ v_{xi}^2 \dots \ x_i^M \ v_{xi}^M)^T$; $\bar{n}_i = (n_i^1 \ n_i^{12} \dots \ n_i^{1M} \ n_i^{21} \ n_i^{22} \dots \ n_i^{2M} \dots \ n_i^{M1} \ n_i^{M2} \dots \ n_i^M)^T$; $M \{\bar{n}_i \bar{n}_i^T\} = V_{ni}$.

Уравнение состояния, описывающее динамику изменения параметров в дискретном времени, запишем в виде [8]:

$$\bar{x}_i = \mathcal{G}_i \bar{x}_{i-1} + G_i \bar{u}_i + \mathcal{G}_i \xi_i, \quad (2)$$

где $\mathcal{G}_i = (2M \times 2M)$ -матрица, описывающая изменение состояния системы в дискретном времени;

$G_i = (2M \times 2M)$ -матрица управляющих воздействий $\bar{u}_i = (0 \ u_i^1 \ 0 \ u_i^2 \dots \ 0 \ u_i^M)^T$;

$\mathcal{G}_i$ – матрица $(2M \times 2M)$, определяющая влияние последовательности случайных величин

$\xi_i = (0 \ \xi_i^1 \ 0 \ \xi_i^2 \dots \ 0 \ \xi_i^M)^T$ с нулевыми средними и ковариационными матрицами $V_{\xi i} = \{\xi_i \xi_i^T\}$.

Элементы вектора $\bar{x}_i$ определяются следующими соотношениями:

$$x_i^l = x_{i-1}^l + v_{x(i-1)}^l T_i, \quad v_{xi}^l = v_{x(i-1)}^l + a_x^l T_i \xi_{xi}^l, \quad l=1, 2, \dots, M, \quad (3)$$

где T_i – интервал времени между соседними наблюдениями; a_x^l – максимальное значение ускорения l -го БПЛА, вызванное нестабильностью работы двигателей и внешними воздействиями.

Проведем оценку $\hat{x}_i$ координат $\bar{x}_i$ с помощью стандартного линейного векторного фильтра Калмана [9]:

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{\mathcal{G}i} + B_i (\bar{z}_i - C\hat{x}_{\mathcal{G}i}), \quad (4)$$

где $\hat{x}_{\mathcal{G}i} = \mathcal{G}_i \hat{x}_{i-1}$;

$$B_i = P_i C^T V_{ni}^{-1} - (2M \times M^2) \text{-матрица};$$

$$P_i = P_{\mathcal{G}i} (E + C^T V_{ni}^{-1} C P_{\mathcal{G}i})^{-1};$$

$$P_{\mathcal{G}i} = \mathcal{G}_i P_{i-1} \mathcal{G}_i^T + V_{\xi i};$$

E – единичная матрица. Начальные условия фильтрации $\hat{x}_{\mathcal{G}1} = M \{\bar{x}_1\} = 0$, $P_{\mathcal{G}1} = M \{\bar{x}_1 \bar{x}_1^T\}$.

Среднеквадратические отклонения ошибок (СКО) оценивания координат составят $\sigma_{\varepsilon i}^l = \sqrt{P_{i(2l-1, 2l-1)}}$,

$l = 1, 2, \dots, M$. Тогда погрешности оценки скоростей движения БПЛА будут определяться как $\sigma_{\varepsilon mi}^l = \sqrt{P_{i(2l,2l)}^l}$, $l = 1, 2, \dots, M$.

Метод 2. Скалярное оценивание после статического комплексирования

Для снижения вычислительных затрат на реализацию многомерного фильтра Калмана при большом числе аппаратов рассмотрим алгоритм определения координат в два этапа (рис. 16). На первом этапе по результатам комплексирования одноразовых (статических) оценок найдем координаты всех БПЛА, а на втором этапе воспользуемся для каждого аппарата раздельным калмановским оцениванием изменяющихся координат.

Задача статического комплексирования решена в работе [8]. Так как все погрешности наблюдений $\bar{n}_i$ имеют нормальное распределение, то наилучшие статические оценки $\tilde{\bar{x}}_i = (\tilde{x}_i^1 \ \tilde{x}_i^2 \ \dots \ \tilde{x}_i^M)^T$ координат $\bar{x}_i = (x_i^1 \ x_i^2 \ \dots \ x_i^M)$ представляют собой линейные комбинации наблюдений на i -м шаге фильтрации независимых от предыдущих состояний:

$$\tilde{\bar{x}}_i = A\bar{z}_i, \quad (5)$$

где $A = (C^T V^{-1} C)^{-1} C^T V^{-1}$ – $(M \times M^2)$ -матрица, содержащая векторы оптимальных коэффициентов для всех БПЛА [8]. Полученный результат позволяет найти ковариационную матрицу ошибок оценивания:

$$V_{\varepsilon i} = M \left\{ (\tilde{\bar{x}}_i - \bar{x}_i)(\tilde{\bar{x}}_i - \bar{x}_i)^T \right\} = A V_i A^T = (C^T V_i^{-1} C)^{-1}, \quad (6)$$

необходимую при построении оптимальных процедур управления и фильтрации вектора изменяющихся параметров. Эта матрица имеет следующую структуру:

$$V_{\varepsilon i} = \begin{pmatrix} D_{xi}^1 & B_{xi}^{12} & \dots & B_{xi}^{1M} \\ B_{xi}^{21} & D_{xi}^2 & \dots & B_{xi}^{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{xi}^{M1} & B_{xi}^{M2} & \dots & D_{xi}^M \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где D_{xi}^l , $l = 1, 2, \dots, M$ – дисперсии ошибок статического комплексирования координат l -го БПЛА.

Не будем учитывать взаимную корреляцию ошибок B_{xi}^{kl} , $k, l = 1, 2, \dots, M$, $k \neq l$. Тогда можно построить относительно простой двумерный фильтр Калмана для последующего раздельного оценивания изменяющихся координат каждого l -го ($l = 1, 2, \dots, M$) БПЛА:

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_i^l \\ \hat{v}_{xi}^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_{xi}^l \\ \hat{v}_{xi}^l \end{pmatrix} + P_{ci} C_c^T \frac{1}{D_{xi}^l} (\tilde{x}_i^l - \hat{x}_{xi}^l), \quad (8)$$

где $P_{ci} = P_{\varepsilon i} \left(E + C_c^T (D_{xi}^l)^{-1} C_c P_{\varepsilon i} \right)^{-1}$ – ковариационная (2×2) -матрица ошибки раздельного оценивания; $C_c = (1 \ 0)$. Предварительная оценка состояний и ковариационная матрица ошибки такой оценки принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{xi}^l &= \hat{x}_{i-1}^l + T_i \hat{v}_{x(i-1)}^l, \hat{v}_{xi}^l = \hat{v}_{x(i-1)}^l, \\ P_{\varepsilon i} &= \mathcal{P}_{ci} P_{c(i-1)} \mathcal{P}_{ci}^T + V_{c \varepsilon i}, \end{aligned} \quad (9)$$

и тогда СКО оценивания координат составит $\sigma_{\varepsilon i}^l = \sqrt{P_{ci(2l-1,2l-1)}^l}$, $l = 1, 2, \dots, M$, а СКО оценки скоростей $\sigma_{\varepsilon vi}^l = \sqrt{P_{ci(2l,2l)}^l}$, $l = 1, 2, \dots, M$.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ

Проведем сравнение эффективности оценивания координат каждым методом при одинаковых начальных условиях. В случае применения однотипных БПЛА погрешности измерения собственных и взаимных координат можно считать одинаковыми и не зависящими от времени, и тогда

$$\begin{aligned} \sigma_{li}^{2(1)} &= \sigma_{li}^{2(2)} = \dots = \sigma_{li}^{2(l)} = \sigma^2, \\ \sigma_{kli}^{2(12)} &= \sigma_{kli}^{2(21)} = \dots = \sigma_{kli}^{2(kl)} = \sigma_{\varepsilon}^2, \\ \sigma_{\varepsilon i}^{(1)} &= \sigma_{\varepsilon i}^{(2)} = \dots = \sigma_{\varepsilon i}^{(l)} = \sigma_{\varepsilon}, \\ \sigma_{\varepsilon vi}^{(1)} &= \sigma_{\varepsilon vi}^{(2)} = \dots = \sigma_{\varepsilon vi}^{(l)} = \sigma_{\varepsilon v}, \\ a_x^{(1)} &= a_x^{(2)} = \dots = a_x^{(l)} = a_x, \end{aligned}$$

где σ – СКО погрешности системы определения собственных координат; σ_{ε} – СКО погрешности системы определения взаимных координат.

На рисунке 2 показаны изменения СКО ошибок оценивания координат (рис. 2а) и скоростей (рис. 2б) БПЛА в дискретном времени. При этом учитывалось: $M = 5$, $T_i = 1$ с, $\sigma = 10$ м. На всех последующих рисунках сплошной линией показаны СКО для первого метода, пунктиром – для второго.

Анализ графиков показывает, что при использовании точной системы определения взаимных координат СКО ошибки оценивания уменьшаются с течением времени, при этом, чем меньшее влияние оказывают внешние возмущения, тем больше выигрыш комплексирования. При этом СКО стремятся к некоторому установившемуся значению. Последующие графики будем строить с учетом таких значений при $t_i = 100$ с. При малой точности средств межсамолетной навигации и сильном влиянии внешних возмущений стабильные значения устанавливаются уже на первых этапах оценивания.

Рис. 2. Изменение СКО ошибки оценивания координат (а) и скоростей (б) БПЛА в дискретном времени

Рис. 3. Зависимости СКО ошибок фильтрации от СКО определения взаимных координат

Рис. 4. Зависимость СКО погрешности оценивания от влияния внешних помех

Рассмотрим зависимости ошибок фильтрации от точности системы определения взаимных расстояний.

Рис. 5. Изменение погрешности оценки координат для различного числа БПЛА

На рисунке 3 представлены зависимости СКО погрешности оценивания координат (3а) и скоростей БПЛА (3б) от СКО ошибки определения взаимных координат с учетом количества БПЛА в группе (M) при $T_i = 1$ с, $\sigma = 10$ м, $a_x = 0,1$ м/с².

Как видно из графиков, выигрыш комплексной обработки навигационных параметров уменьшается при использовании малого числа БПЛА в строю и с применением систем определения взаимных координат низкой точности.

Зависимости СКО ошибок фильтрации от уровня внешних возмущений представлены на рисунке 4а для оценки координат БПЛА, и при оценивании скоростей летательных аппаратов (рис. 4б). При этом учитывалось $T_i = 1$ с, $\sigma = 10$ м, $\sigma_g = 1$ м.

Анализ графиков показывает снижение эффективности второго метода при интенсивных внешних воздействиях и большом числе БПЛА.

На рисунках 5а и 5б изображены графики зависимости СКО оценки координат и скоростей соответственно от количества БПЛА в группе с использованием реальных систем навигации при внешних воздействиях $a_x = 0,001$ м/с² (рис. 5а) и $a_x = 0,1$ м/с² (рис. 5б). Для расчетов применялись параметры точности спутниковой системы навигации GPS – 10 м; системы межсамолетной навигации СИНТЕЛА – 1 м. При этом $t_i = 100$ с, $T_i = 1$ с.

Из графиков следует, что применение более точных средств межсамолетной навигации дает преимущество при увеличении числа БПЛА в строю. При этом в случае малых внешних возмущений исследуемые методы одинаково эффективны. При увеличении влияния внешних помех векторный фильтр Калмана имеет преимущество в точности оценивания.

Таким образом, оба метода комплексирования позволяют повысить точность определения местоположения группы БПЛА. Более эффективным является метод прямого векторного оценивания, однако скалярное оценивание после статического комплексирования позволяет значительно упростить алгоритмы вычисления оценок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ двух методов комплексирования навигационных параметров группы БПЛА показал, что наибольшая эффективность обоих методов достигается при точном измерении взаимных координат и с увеличением числа БПЛА в группе. При сравнении алгоритмов по эффективности выявлено преимущество метода векторного оценивания, но метод скалярного оценивания с предварительным комплексированием требует значительно меньших вычислительных затрат при тех же условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко А.А. Задача формирования строя в группе БПЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3 (128). – С. 22–30.
2. Ищук И.Н., Зубков С.Д., Аккубеков П.А. Способы применения групп беспилотных аппаратов коптерного типа одним оператором // Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. – Коломна : 924 ГЦ БпА МО РФ, 2017. – С. 211–217.
3. Распределенная система управления коалициями беспилотных летательных аппаратов, функционирующих в условиях отсутствия сигналов глобальных навигационных систем / К.С. Яковлев, В.В. Хитков, А.В. Петров, М.И. Логинов // Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014. – Казань, 2014. – Т. 3. – С. 350–358.
4. Система навигации группы БЛА на основе маркеров / К.С. Яковлев, В.В. Хитков, М. И. Логинов, А.В. Петров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 4 (5). – С. 44–48.
5. Васильев К. К., Бобков А. В. Динамическое использование ориентиров для оценки координат автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – № 12. – С. 11–15.
6. Ефанов В.Н., Мизин С.В., Неретна В.В. Управление полетом БПЛА в строю на основе координации взаимодействия группы летательных аппаратов // Вестник УГАТУ. Математика. – 2014. – № 1 (62). – С. 114–121.
7. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов / К.С. Амелин, Е.И. Антал, В.И. Васильев, Н.О. Граничина // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2009. – Т. 5. – С. 157–166.
8. Васильев К.К. Совместная оценка координат группы автономных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – № 11. – С. 56–60.
9. Васильев К.К. Применение статистических методов при проектировании корабельных систем связи и автоматического управления движением // Автоматизация процессов управления. – 2011. – № 1 (23). – С. 72–77.
10. Васильев К.К. Королев Л.Ю. Динамическое оценивание группы БПЛА // Сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2019. – Т. 3. – С. 412–418.

REFERENCES

1. Diachenko A.A. Zadacha formirovaniia stroia v gruppe BPLA [The Task of Forming Structure in Group of UAVS]. *Izvestiia YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, no. 3 (128), pp. 22–30.
2. Ishchuk I.N., Zubkov S.D., Akkubekov P.A. Sposoby primeneniia grupp bespilotnykh apparatov kopternogo tipa odnim operatorom [Ways of Using the Group of Unmanned

Multicopters Controlled by one Operator]. *Perspektivy razvitiia i primeneniia kompleksov s bespilotnymi letatelnyimi apparatami* [Prospects for Development and Application of Systems with Unmanned Aerial Vehicles. Proc. of Sci. Conf.]. Kolomna, 924 GTs BpA MO RF, 2017, pp. 211–217.

3. Iakovlev K.S., Khitkov V.V., Petrov A.V., Loginov M.I. Raspredelennaia sistema upravleniia koalitsiiami bespilotnykh letatelnykh apparatov, funktsioniruiushchikh v usloviakh otsutstviia signalov globalnykh navigatsionnykh sistem [The Distributed Control System of the Combination of Unmanned Aerial Vehicles that Operate in the Absence of GPS-Signals]. *Chetyrnadtsataia natsionalnaia konferentsiia po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2014* [The 14th International Conference on Artificial Intelligence with International Participation]. Kazan, 2014, vol. 3, pp. 350–358.

4. Iakovlev K.S., Khitkov V.V., Loginov M. I., Petrov A.V. Sistema navigatsii gruppy BLA na osnove markerov [Navigation System Based on Markers for UAV Group]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2014, no. 4 (5), pp. 44–48.

5. Vasilev K. K., Bobkov A. V. Dinamicheskoe ispolzovanie orientirov dlia otsenki koordinat avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Dynamic Use Landmarks for Coordinates Estimation]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy* [Journal Information Measuring and Control Systems], 2017, no. 12, pp. 11–15.

6. Efanov V.N., Mizin S.V., Neretna V.V. Upravlenie poletom BPLA v stroiu na osnove koordinatsii vzaimodeistviia

gruppy letatelnykh apparatov [Flight Control of the UAV in the Ranks on the Basis of Coordination of Interaction of the Group of Aircraft]. *Vestnik UGATU. Matematika* [Proc. of USATU. Mathematics Series], 2014, no. 1 (62), pp. 114–121.

7. Amelin K.S., Antal E.I., Vasilev V.I., Granichina N.O. Adaptivnoe upravlenie avtonomnoi gruppy bespilotnykh letatelnykh apparatov [Adaptive Control of Autonomous Group of Unmanned Aerial Vehicles]. *Stokhasticheskaya optimizatsiia v informatike* [Stochastic Optimization in Informatics], 2009, vol. 5, pp. 157–166.

8. Vasilev K.K. Sovmestnaia otsenka koordinat gruppy avtonomnykh apparatov [Combined Estimation of the Coordinates of Autonomous Vehicles Group]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy* [Journal Information Measuring and Control Systems], 2018, no. 11, pp. 56–60.

9. Vasilev K.K. Primenenie statisticheskikh metodov pri proektirovanii korabelnykh sistem svyazi i avtomaticheskogo upravleniia dvizheniem [Use of Statistics Methods for Design of Ship's Communications and Automatic Movement-Control Systems]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2011, no. 1 (23), pp. 72–77.

10. Vasilev K.K. Korolev L.Iu. Dinamicheskoe otsenivanie gruppy BPLA [Dynamic Estimation of the Group of UAV]. *Sb. tr. XXV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Radiolokatsiia, navigatsiia, svyaz"* [Proc. of the 25th Int. Sci. Tech. Conf. on Radar, Navigation, Communication]. Voronezh, Izdatelskii dom VGU Publ., 2019, vol. 3, pp. 412–418.