УДК 629.05

К.К. Васильев, Л.Ю. Королев

ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ 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

Приведены известные и предложены новые алгоритмы комплексирования оценок собственных и взаимных координат и скоростей перемещения для произвольного числа автономных аппаратов. Учтено влияние на систему неконтролируемых внешних возмущений. Предложены и исследованы четыре варианта построения алгоритмов обработки навигационных параметров на основе двухэтапного комплексирования наблюдений, векторного и скалярного фильтров Калмана. Первый способ подразумевает оценку координат и скоростей всех летательных аппаратов векторным фильтром Калмана. Второй способ заключается в комплексировании скоростей на первом этапе, а на втором – в применении векторного фильтра Калмана. Третий способ основан на раздельном комплексировании координат и скоростей на первом этапе с последующей обработкой оценок скалярным фильтром Калмана. В четвертом методе осуществляются комплексирование наблюдений собственных и взаимных координат и последующая их обработка скалярным фильтром при учете непосредственных наблюдений собственных скоростей аппаратов. Получены выражения для ковариационных матриц ошибок комплексирования и приведены результаты сравнительного анализа эффективности рассмотренных подходов. Проанализированы вычислительные затраты при оценке местоположения каждым из рассмотренных алгоритмов.

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

doi: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-17-24

OPPORTUNITIES FOR REDUCTION OF COMPUTATIONAL COSTS WHEN DETERMINING THE COORDINATES OF AUTONOMOUS VEHICLE GROUP

Konstantin Konstantinovich Vasilev, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from the Radioengineering Faculty of Leningrad Electrotechnical Institute n.a. V.I. Ulyanov (Lenin); 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; an author of monographs, manuals, and articles in the field of statistical synthesis and 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 the unmanned aerial vehicle navigation. e-mail: l.y.korolev@yandex.ru.

Abstract

The article deals with the known and new algorithms proposed by authors for integrating the estimates of eigen and mutual coordinates and velocities of movement for an arbitrary number of autonomous vehicles. The impact of uncontrolled external disturbances on the system is taken into account. Four versions for developing the navigation-parameter processing algorithms on the basis of two-stage integration of observations, Kalman vector and scalar filters are proposed and examined. The first technique involves estimating the coordinates and speeds of all aerial vehicles with a Kalman vector filter. The second technique is to integrate velocities at the first stage and to use the Kalman vector filter at the second stage. The third one is based on separate integration of coordinates and velocities at the first stage with subsequent processing of estimates with a scalar Kalman filter. In the fourth technique, observations of eigen and mutual coordinates are integrated and processed by a scalar filter, taking into account direct observations of eigen speed of the apparatus. Expressions for covariance error matrices are derived, and the comparison results of the effectiveness of the considered approaches are given. Computational costs are analyzed when estimating the location by the use of each of the considered algorithms.

Key words: integration of estimates, coordinates, state vector, observation model, stochastic equation, Kalman filter, covariance of errors.

ВВЕДЕНИЕ

Групповое взаимодействие роботов находит все большее применение в различных сферах деятельности человека. Примерами могут служить воздушные, наземные, наводные, подводные или комбинированные комплексы автономных аппаратов. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) применяют в целях картографирования, патрулирования местности, организации каналов связи, доставки грузов, действий при чрезвычайных ситуациях. Роботизированные системы позволяют минимизировать влияние человеческого фактора на процесс решения задачи, а применение автономных устройств в составе группы позволяет значительно расширить круг решаемых задач, повысить эффективность и надежность системы.

Решение групповых задач сталкивается с рядом особенностей, характерных для организации взаимодействия автономных систем между собой. В работе [1] рассмотрен вопрос формирования строя в группе БПЛА для более точного выполнения поставленной задачи. Вопросы управления группами роботизированных систем рассмотрены в [2, 3].

Одним из основных компонентов системы управления группой БПЛА является точное определение координат каждого из аппаратов. Кроме предотвращения столкновения, решение задачи повышения точности определения положения роботов необходимо в случаях больших неконтролируемых внешних воздействий или ограниченных возможностей применения спутниковых систем навигации [4, 5].

Способы повышения точности для группы БПЛА описаны в работах [6, 7], где предлагается применять технологию одновременной локализации и картографирования SLAM или систему навигации на основе локальных

объектов (маркеров). Снижение ошибки определения координат летательных аппаратов можно достичь путем комплексирования данных инерциальных и спутниковых систем навигации [8].

Повысить точность определения местоположения БПЛА при групповом взаимодействии удастся и с помощью комплексирования данных о взаимных навигационных параметрах группы БПЛА. В работах [9–11] описаны алгоритмы комплексирования и обработки навигационных параметров группы автономных аппаратов, а также проанализирована их эффективность. Однако все эти алгоритмы требуют значительных вычислительных затрат, связанных с большой размерностью вектора состояния объектов. Размерность можно уменьшить при высокой точности определения собственных и взаимных скоростей БПЛА. При этом требуется решить нетривиальные задачи построения модифицированных фильтров Калмана. Для решения поставленных задач в работе предложены четыре алгоритма оценивания координат группы автономных аппаратов и приведены результаты сравнительного анализа погрешностей местоопределения и вычислительных затрат.

Постановка задачи

Рассмотрим алгоритмы оценивания декартовых координат x_i^l , y_i^l , z_i^l и проекций скоростей v_{xi}^l , v_{yi}^l , v_{zi}^l $l = 1, 2, \dots, M$ группы M БПЛА, в момент времени t_i . Для оценки координат и скоростей могут использоваться как автономные датчики, например, инерциальные системы или GPS, так и измерения взаимных навигационных параметров средствами межсамолетной навигации. Будем предполагать, что

такие наблюдения пересчитываются в измерения разностей всех $\bar{x}_i^l - \bar{x}_i^k$ навигационных параметров $\bar{x}_i^l = (x_i^l \ y_i^l \ z_i^l \ v_{xi}^l \ v_{yi}^l \ v_{zi}^l)^T$ l -го и k -го БПЛА; $l, k = 1, 2, \dots, M, k \neq l$.

Будем считать, что комплексирование производит- ся отдельно при оценивании координат и скоростей по осям X, Y и Z . Это справедливо, если полагать, что ошибки измерения координат и их разностей некоррелированы. В этом случае достаточно рассмотреть решение задачи для одной координаты X . Для осей Y и Z все алгоритмы повторяются с точностью до обозначений навигационных параметров.

Рассмотрим возможности оптимальной оценки изменяющихся навигационных параметров M аппаратов с помощью алгоритмов обработки данных, блок-схемы которых изображены на рисунке 1.

После получения данных от систем определения собственных и взаимных навигационных параметров формируются векторы наблюдений координат $\bar{z}_{x(i-1)}$ и скоростей $\bar{z}_{v(i-1)}$. При прямой оценке векторным фильтром Калмана (рис. 1а) на выходе фильтра получаем расширенный вектор $\hat{\bar{x}}_{pi}$, включающий оптимальные оценки координат $\hat{x}_i$ и скоростей $\hat{v}_i$. Во втором алгоритме (рис. 1б) после получения очередных наблюдений навигационных параметров осуществляются комплексирование значений скоростей и учет полученных оценок скоростей $\hat{v}_{i-1}$ в векторном фильтре Калмана. Оптимальная оценка вектора координат $\hat{x}_i$ получается на выходе векторного фильтра Калмана, а оценка вектора скоростей $\hat{v}_i$ – на выходе блока статического комплексирования. На рисунке 1в изображена блок-схема третьего вариан-

та алгоритма обработки, заключающегося в раздельном комплексировании значений координат и скоростей и последующем выделении из векторов состояния значений навигационных параметров каждого БПЛА. Затем на каждом БПЛА осуществляется обработка оценок собственных координат $\hat{x}_{i-1}^l$ одномерным фильтром Калмана при учете комплексированных оценок собственных скоростей $\hat{v}_{i-1}^l$. Оптимальную оценку координат $\hat{x}_i^l$ каждого БПЛА получаем на выходе одномерного фильтра Калмана, а оценку скоростей $\hat{v}_i^l$ – на выходе блока комплексирования. Четвертый вариант (рис. 1г) предполагает использование только автономных наблюдений собственных скоростей z_{vi}^l . При этом вектор координат находится с помощью комплексирования наблюдений $\hat{x}_{i-1}^l$ и последующего сглаживания одномерным фильтром Калмана при учете z_{vi}^l . На выходе получаем оценку координат $\hat{x}_i^l$ каждого БПЛА и необработанные данные систем определения собственных скоростей z_{vi}^l .

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

Вариант 1. Общий векторный фильтр Калмана

Пусть вектор наблюдений $\bar{z}_{pi} = C_p \bar{x}_{pi} + \bar{n}_{pi}$, $\bar{z}_{pi} = (\bar{z}_{xi}^T \ \bar{z}_{vi}^T)^T$, включает наблюдения собственных $z_{xi}^l = x_i^l + n_{xi}^l$, $z_{vi}^l = v_i^l + n_{vi}^l$ и взаимных $z_{xi}^{lk} = (x_i^l - x_i^k) + n_{xi}^{lk}$, $z_{vi}^{lk} = (v_i^l - v_i^k) + n_{vi}^{lk}$ координат и скоростей:

Рис. 1. Блок-схемы алгоритмов оценивания навигационных параметров

$$\bar{z}_{xi} = C\bar{x}_i + \bar{n}_{xi},$$

$$\bar{z}_{vi} = C\bar{v}_i + \bar{n}_{vi},$$

где $C_p = \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix}$; $\bar{n}_{pi} = (\bar{n}_{xi}^T \quad \bar{n}_{vi}^T)^T$ – вектор, состоящий из погрешностей наблюдений собственных n_{xi}^l , n_{vi}^l и взаимных n_{xi}^{lk} , n_{vi}^{lk} координат и скоростей, являющихся независимыми гауссовскими величинами с нулевыми средними и заданными ковариационными матрицами ошибок $M\{\bar{n}_{pi}\bar{n}_{pi}^T\} = V_{npi}$, $M\{\bar{n}_{xi}\bar{n}_{xi}^T\} = V_{nxi}$, $M\{\bar{n}_{vi}\bar{n}_{vi}^T\} = V_{nvi}$.

Модель изменения состояния параметров запишем следующим образом:

$$x_i^l = x_{(i-1)}^l + v_{(i-1)}^l T_i, v_i^l = v_{(i-1)}^l + a_{xi}^l T_i \xi_i^l, \quad (1)$$

$$l = 1, 2, \dots, M,$$

где T_i – интервал времени между соседними наблюдениями; a_x^l – среднее значение ускорения l -го БПЛА, вызванное нестабильностью работы двигателей и внешними воздействиями; ξ_i^l – независимые случайные величины с нулевыми средними и единичными дисперсиями. Тогда векторное уравнение состояния, описывающее динамику изменения параметров в дискретном времени, запишется в виде:

$$\bar{x}_{pi} = \Phi_{pi} \bar{x}_{p(i-1)} + \Theta_i \xi_i,$$

где Φ_{pi} , Θ_i – матрицы, определяемые уравнениями (1).

Проведем оценку $\hat{\bar{x}}_{pi}$ координат $\bar{x}_i$ и скоростей $\bar{v}_i$ с помощью линейного векторного фильтра Калмана (рис. 1а) [12]:

$$\hat{\bar{x}}_{pi} = \hat{\bar{x}}_{api} + B_i (\bar{z}_{pi} - C_p \hat{\bar{x}}_{api}),$$

где $\hat{\bar{x}}_{api} = \Phi_{pi} \hat{\bar{x}}_{p(i-1)}$ – вектор экстраполированных навигационных параметров;

$$B_i = P_i C_p^T V_{npi}^{-1};$$

$P_i = P_{\varepsilon i} (E + C_p^T V_{npi}^{-1} C_p P_{\varepsilon i})^{-1}$ – ковариационная матрица ошибок оценивания;

$P_{\varepsilon i} = \Phi_{pi} P_{\varepsilon(i-1)} \Phi_{pi}^T + V_{\xi i}$ – ковариационная матрица ошибок экстраполяции;

E – единичная матрица.

Начальные условия фильтрации:

$$\hat{\bar{x}}_{p1} = M\{\bar{x}_{p1}\} = 0, P_{\varepsilon 1} = M\{\bar{x}_{p1} \bar{x}_{p1}^T\}.$$

Вариант 2. Векторная фильтрация координат после статического комплексирования скоростей

Для снижения вычислительных затрат на реализацию многомерного фильтра Калмана при большом числе аппаратов рассмотрим алгоритм определения навигационных параметров в два этапа (рис. 1б–г). На первом этапе по результатам комплексирования однократных (статических) оценок найдем значения ско-

ростей всех БПЛА, а на втором этапе применим векторную фильтрацию для оценивания координат с учетом статических оценок скоростей (рис. 1б).

Алгоритм статического комплексирования описан в работе [9]. Так как все погрешности наблюдений $\bar{n}_{xi}$ и $\bar{n}_{vi}$ имеют нормальное распределение, то наилучшие статические оценки навигационных параметров представляют собой линейные комбинации наблюдений на i -м шаге фильтрации независимо от предыдущих состояний.

По полученным наблюдениям на каждом шаге фильтрации находятся оценки скоростей

$$\tilde{\bar{v}}_{(i-1)} = (\tilde{v}_{(i-1)}^1 \quad \tilde{v}_{(i-1)}^2 \quad \dots \quad \tilde{v}_{(i-1)}^M)^T, \quad (2)$$

$$\tilde{\bar{v}}_{(i-1)} = A_v \bar{z}_{v(i-1)},$$

где $A_v = (C^T V_{nv(i-1)}^{-1} C)^{-1} C^T V_{nv(i-1)}^{-1}$ – матрица, содержащая оптимальные коэффициенты для скоростей всех БПЛА. Полученный результат позволяет найти ковариационную матрицу ошибок статического оценивания скоростей

$$V_{\varepsilon v(i-1)} = M\left\{\left(\tilde{\bar{v}}_{(i-1)} - \bar{v}_{(i-1)}\right)\left(\tilde{\bar{v}}_{(i-1)} - \bar{v}_{(i-1)}\right)^T\right\} = A_v V_{nv(i-1)} A_v^T = \left(C^T V_{nv(i-1)}^{-1} C\right)^{-1}, \quad (3)$$

необходимую для фильтрации вектора изменяющихся параметров. Эта матрица имеет структуру:

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

где $D_{v(i-1)}^l$, $l = 1, 2, \dots, M$ – дисперсии ошибок статического комплексирования скоростей l -го БПЛА; $B_{v(i-1)}^{lk}$, $l, k = 1, 2, \dots, M$, $k \neq l$ – взаимная корреляция ошибок.

Тогда можно провести оценку $\hat{\bar{x}}_i$ координат $\bar{x}_i$ с помощью стандартного линейного векторного фильтра Калмана:

$$\hat{\bar{x}}_i = \hat{\bar{x}}_{\varepsilon i} + B_i (\bar{z}_{x(i-1)} - C \hat{\bar{x}}_{\varepsilon i}),$$

где $\hat{\bar{x}}_{\varepsilon i} = \hat{\bar{x}}_{(i-1)} + \tilde{\bar{v}}_{(i-1)} T_i$ – вектор экстраполированных параметров;

$B_i = P_i C^T V_{nxi}^{-1}$; $P_i = P_{\varepsilon i} (E + C^T V_{nxi}^{-1} C P_{\varepsilon i})^{-1}$ – ковариационная матрица ошибок оценивания $P_{\varepsilon i} = P_{(i-1)} + (V_{\varepsilon v(i-1)} + V_{\xi i}) T_i^2$ – ковариационная матрица ошибок экстраполяции;

$$V_{\xi i} = \begin{pmatrix} (a_{xi}^1 T_i)^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & (a_{xi}^2 T_i)^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & (a_{xi}^M T_i)^2 \end{pmatrix}.$$

Начальные условия фильтрации:

$$\hat{x}_{\mathcal{A}1} = M \{ \bar{x}_1 \} = 0, P_{\mathcal{A}1} = M \{ \bar{x}_1 \bar{x}_1^T \}.$$

Вариант 3. Одномерный фильтр Калмана после раздельного комплексирования координат и скоростей

Рассмотрим алгоритм оценки навигационных параметров для снижения вычислительных затрат на обработку координат и скоростей при помощи раздельного комплексирования и последующего оценивания координат одномерным фильтром Калмана на каждом БПЛА (рис. 1в). По полученным наблюдениям, аналогично (2) и (3), на каждом шаге фильтрации находятся оценки координат $\tilde{\bar{x}}_{(i-1)} = (\tilde{x}_{(i-1)}^1 \quad \tilde{x}_{(i-1)}^2 \quad \dots \quad \tilde{x}_{(i-1)}^M)^T$ и ковариационная матрица ошибок статического оценивания:

$$\tilde{\bar{x}}_{(i-1)} = A_x \bar{x}_{(i-1)}, \quad (4)$$

$$V_{\varepsilon x(i-1)} = M \left\{ \left(\tilde{\bar{x}}_{(i-1)} - \bar{x}_{(i-1)} \right) \left(\tilde{\bar{x}}_{(i-1)} - \bar{x}_{(i-1)} \right)^T \right\} = A_x V_{nx(i-1)} A_x^T = \left(C^T V_{nx(i-1)}^{-1} C \right)^{-1}, \quad (5)$$

где $A_x = \left(C^T V_{nx(i-1)}^{-1} C \right)^{-1} C^T V_{nx(i-1)}^{-1}$ – матрица, содержащая оптимальные коэффициенты для координат всех БПЛА, а ковариационная матрица ошибок имеет структуру:

$$V_{\varepsilon x(i-1)} = \begin{pmatrix} D_{x(i-1)}^1 & B_{x(i-1)}^{12} & \dots & B_{x(i-1)}^{1M} \\ B_{x(i-1)}^{21} & D_{x(i-1)}^2 & \dots & B_{x(i-1)}^{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{x(i-1)}^{M1} & B_{x(i-1)}^{M2} & \dots & D_{x(i-1)}^M \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $D_{x(i-1)}^l$, $l = 1, 2, \dots, M$ – дисперсии ошибок статического комплексирования координат l -го БПЛА; $B_{x(i-1)}^{lk}$, $l, k = 1, 2, \dots, M$, $k \neq l$ – взаимная корреляция ошибок.

Если не учитывать взаимную корреляцию ошибок, то можно построить простой одномерный фильтр Калмана для оценки изменяющихся координат каждого БПЛА:

$$\hat{x}_i^l = \hat{x}_{\mathcal{A}i}^l + P_i^l \frac{1}{D_{x(i-1)}^l} \left(\tilde{x}_{(i-1)}^l - \hat{x}_{\mathcal{A}i}^l \right),$$

где $\hat{x}_{\mathcal{A}i}^l = \hat{x}_{(i-1)}^l + \tilde{v}_{(i-1)}^l T_i$ – экстраполированная оценка координаты;

$$P_i^l = P_{\mathcal{A}i}^l / \left(1 + P_{\mathcal{A}i}^l / D_{x(i-1)}^l \right);$$

$$P_{\mathcal{A}i}^l = P_{(i-1)}^l + \left(D_{v(i-1)}^l + \left(a_{xi}^l T_i \right)^2 \right) T^2 - \text{дисперсия}$$

ошибки экстраполяции.

Начальные условия фильтрации:

$$\hat{x}_{\mathcal{A}1}^l = M \{ x_1^l \} = 0, P_{\mathcal{A}1} = M \{ x_1^{l(2)} \}.$$

Следует отметить, что в этом варианте используется новый подход к калмановскому оцениванию, когда вектор параметров содержит только координату, а комплексированная оценка скорости $\tilde{v}_{(i-1)}^l$ и ее дисперсия $D_{v(i-1)}^l$ учитываются только при прогнозировании. Это позволяет существенно сократить общий объем вычислений.

Вариант 4. Одномерный фильтр Калмана после комплексирования координат

При использовании высокоточных систем определения собственных скоростей можно исключить из алгоритма оценивания взаимные измерения скорости. Тогда после комплексирования значений координат дальнейшую обработку будем проводить на каждом БПЛА одномерным фильтром Калмана с учетом необработанных наблюдений собственных скоростей (рис. 1г).

По выражениям (4) и (5) будет произведена статическая оценка координат $\tilde{\bar{x}}_{(i-1)}$ и определена ковариационная матрица ошибки оценивания $V_{\varepsilon x(i-1)}$ со структурой (6). Оценка координат $\hat{x}_i^l$, при помощи одномерного фильтра Калмана и с учетом наблюдений за собственными скоростями z_{vi}^l каждого БПЛА, запишется в виде:

$$\hat{x}_i^l = \hat{x}_{\mathcal{A}i}^l + P_i^l \frac{1}{D_{x(i-1)}^l} \left(\tilde{x}_{(i-1)}^l - \hat{x}_{\mathcal{A}i}^l \right),$$

$$\text{где } \hat{x}_{\mathcal{A}i}^l = \hat{x}_{(i-1)}^l + z_{v(i-1)}^l T_i;$$

$$P_i^l = P_{\mathcal{A}i}^l / \left(1 + P_{\mathcal{A}i}^l / D_{x(i-1)}^l \right);$$

$$P_{\mathcal{A}i}^l = P_{(i-1)}^l + \left(\sigma_{v(i-1)}^{l(2)} + \left(a_{xi}^l T_i \right)^2 \right) T^2,$$

$$l = 1, 2, \dots, M.$$

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ

Проведем сравнение эффективности алгоритмов оценивания координат при одинаковых начальных условиях на основании результатов математического моделирования. В случае применения однотипных БПЛА погрешности измерения координат и скоростей можно считать одинаковыми. Обозначим σ и σ_g – среднеквадратическое отклонение (СКО) погрешности измерения собственных и взаимных координат соответственно, σ_v и σ_{vg} – СКО погрешности измерения собственных и

взаимных скоростей БПЛА соответственно. Для определения собственных координат предполагается использование GPS ($\sigma = 10$ м), а для взаимных координат – системы СИНТЕЛЛА ($\sigma_{\theta} = 1$ м). Рассмотрены два случая применения систем определения скоростей с разной точностью. В случае применения точных приборов предполагается использование системы определения собственных скоростей СВС-Л ($\sigma_v = 0,0025$ м/с) и взаимных скоростей ЛИС-41-2 ($\sigma_{v\theta} = 0,01$ м/с). Вариант использования малоточных систем подразумевает применение системы GPS для определения собственных скоростей ($\sigma_v = 3$ м/с) и системы ДИСС-15 в качестве датчиков взаимных скоростей ($\sigma_{v\theta} = 0,4$ м/с). Показатели точности систем определены для скорости перемещения БПЛА ($v_i = 0,4$ м/с).

На рисунке 2 сплошной линией обозначены зависимости СКО погрешности обработки данных пяти БПЛА общим векторным фильтром Калмана, пунктирной линией – векторной фильтрацией координат после статического комплексирования скоростей, штриховой линией – одномерным фильтром Калмана после раздельного комплексирования координат и скоростей и штрихпунктирной линией – одномерным фильтром Калмана после комплексирования координат. В случае применения высокоточных систем определения скоростей кривые обозначены C1, а малоточных систем – C2 при начальных условиях $v_i = 10$ м/с, $T_i = 1$ с, $a_x = 0,01$ м/с².

Рис. 2. Изменения СКО ошибки оценивания координат в дискретном времени

При использовании точных навигационных систем кривые практически совпадают при применении любого из рассматриваемых алгоритмов оценивания. В случае малоточных систем зависимости совпадают при векторной фильтрации координат после статического комплексирования скоростей (вариант 2) и при оценивании одномерным фильтром Калмана после раздельного комплексирования координат и скоростей (вариант 3). График отображает явное преимущество в снижении погрешности оценки координат при применении точных систем определения собственных и взаимных скоростей любым из рассмотренных методов.

При применении систем низкой точности лучшую эффективность имеет векторный фильтр Калмана, меньшую – одномерный фильтр после комплексирования координат.

Дисперсии погрешностей, изменяясь в дискретном времени, стремятся к некоторому установившемуся значению. Поэтому последующие графики будем строить с учетом таких значений при $t_i = 120$ с. Зависимости СКО погрешности фильтрации от величины влияния внешних возмущений представлены на рисунке 3. В качестве начальных условий принято $M = 5$, $v_i = 10$ м/с, $T_i = 1$ с.

Рис. 3. Зависимости СКО ошибок оценивания от величины внешних возмущений

Приведенные графики отображают снижение точности оценки координат при увеличении внешних воздействий. Наименьшее влияние возмущения оказывают на алгоритм векторной калмановской фильтрации при применении точных приборов (кривые C1). В этом случае близкую эффективность показали одномерный фильтр Калмана после раздельного комплексирования координат и скоростей и оценивание одномерным фильтром Калмана после комплексирования координат. Однако СКО погрешности при этом выше, чем при проведении векторной фильтрации координат после статического комплексирования скоростей.

Общий векторный фильтр Калмана в случае использования неточных систем определения скоростей также показывает наилучшую эффективность. Рассмотренные алгоритмы 2 и 3 имеют схожие зависимости при малых внешних возмущениях. С увеличением посторонних помех векторная фильтрация эффективнее одномерных фильтров. Зависимости СКО погрешности оценивания от внешних воздействий при применении одномерных фильтров при больших возмущениях стремятся к одному значению. При меньших показателях a_x одномерный фильтр Калмана после раздельного комплексирования координат и скоростей эффективнее скалярной фильтрации после комплексирования только координат.

Сравним рассматриваемые методы по величине вычислительных затрат. Предположим, что расчет

навигационных параметров производится на каждом летательном аппарате. На рисунке 4 представлен график зависимости времени вычисления оценок t_a от количества БПЛА, данные которых обрабатываются. Оценку времени будем производить для 120 наблюдений на одном вычислительном устройстве.

Рис. 4. Зависимость времени вычисления оценок от количества БПЛА

Анализ графиков показывает, что для всех методов характерно увеличение времени обработки данных при росте числа M летательных аппаратов в группе. Графики отображают значительное увеличение времени вычислений при работе алгоритмов с применением векторного фильтра Калмана, причем общий фильтр требует большего времени, чем метод векторной фильтрации координат после статического комплексирования скоростей. Наименьшее время на обработку навигационных параметров требуется при оценивании одномерным фильтром Калмана после комплексирования значений координат.

Таким образом, все рассмотренные методы обработки навигационных параметров позволяют с разной степенью повысить точность определения координат группы БПЛА. Анализ показал, что снижения СКО ошибки фильтрации можно добиться применением высокоточных датчиков определения собственных и взаимных скоростей. По результатам сравнения методов лучшие показатели точности у алгоритма общей векторной калмановской фильтрации, однако на вычисление оценок этим методом требуется большее количество времени или ресурсов. Наиболее экономичным является алгоритм, включающий одномерный фильтр Калмана после комплексирования координат, но точность оценивания навигационных параметров этим методом является наименьшей из анализируемых вариантов. В большинстве рассмотренных ситуаций алгоритм векторной фильтрации координат после статического комплексирования скоростей и одномерный фильтр Калмана после раздельного комплексирования координат и скоростей имеют равные показатели точности, однако алгоритм со скалярным фильтром имеет значительное преимущество по времени вычисления оценок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ рассмотренных методов обработки навигационных параметров группы БПЛА выявил, что наибольшая эффективность достигается при точных измерениях взаимных скоростей и при увеличении числа аппаратов в группе. Сравнение показало, что общий векторный фильтр Калмана позволяет достичь наименьшей погрешности оценивания, однако такой способ требует большего количества вычислительных ресурсов. Наименее ресурсозатратным оказался одномерный фильтр Калмана после комплексирования координат, который значительно уступает по точности определения местоположения устройств в случае применения малоточных систем определения скоростей БПЛА. Одномерный фильтр Калмана после раздельного комплексирования координат и скоростей близок по вычислительным затратам к скалярному фильтру после комплексирования только координат, а эффективность метода сравнима с векторной фильтрацией координат после статического комплексирования скоростей при применении малоточных систем определения собственных и взаимных скоростей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко А.А. Задача формирования строя в группе БПЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 3 (128). С. 22–30.
2. Норсеев С.А., Багаев Д.В. Принципы группового управления роботами // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2014. № 4 (84). С. 30–33.
3. 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. Колонна : 924 ГЦ БпА МО РФ, 2017. С. 211–217.
4. Ефанов В.Н., Мизин С.В., Неретина В.В. Управление полетом БПЛА в строю на основе координации взаимодействия группы летательных аппаратов // Вестник УГАТУ. Математика. 2014. № 1 (62). С. 114–121.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. Норсеев С.А., Буров Д.А., Тютюгин Д.Ю. К вопросу о комплексировании навигационной информации в двухканальной гибридной навигационной системе // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 1. С. 3–10.

9. Васильев К.К. Совместная оценка координат группы автономных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. № 11. С. 56–60.

10. Васильев К.К., Королев Л.Ю. Оценивание изменяющихся координат группы автономных аппаратов // Автоматизация процессов управления. 2019. № 3 (57). С. 86–92.

11. Васильев К.К., Бобков А.В. Королев Л.Ю. Определение навигационных параметров в группе автономных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2020. № 1. С. 63–70.

12. Васильев К.К. Оптимальная обработка сигналов в дискретном времени : учеб. пособие. М. : Радиотехника, 2016. 288 с.

REFERENCES

1. Diachenko A.A. Zadacha formirovaniia stroia v gruppe BPLA [The Task of Forming Structure in Group of UAVS]. *Izvestiia YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Journal of Southern Federal University. Engineering Sciences], 2012, no. 3 (128), pp. 22–30.

2. Norseev S.A., Bagaev D.V. Printsipy gruppovogo upravleniia robotami [Principles of Robots Group Control]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii raketnykh i arteliriskikh nauk* [Bull. of the Russian Academy of Missile and Ammunition Sciences], 2014, no. 4 (84), pp. 30–33.

3. Ishchuk I.N., Zubkov S.D., Akkubekov P.A. Sposoby primeneniia grupp bespilotnykh apparatov kopternogo tipa odnim operatorom [Methods for Application of the Group of Unmanned Air Drone Copters by an Operator]. *Perspektivy razvitiia i primeneniia kompleksov s bespilotnymi letatelnyimi apparatami* [Prospects of Development and Application of UAV Systems]. Kolomna, 924 GTs BpA MO RF, 2017, pp. 211–217.

4. Efanov V.N., Mizin S.V., Neretina 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* [Scientific Journal 'Vestnik USATU'. Ufa State Aviation Technical University], 2014, no. 1 (62), pp. 114–121.

5. Amelin K.S., Antal E.I., Vasilev V.I., Granichina N.O. Adaptivnoe upravlenie avtonomnoi gruppoy bespilotnykh letatelnykh apparatov [Adaptive Control of the Autonomous

Group of Unmanned Aerial Vehicles]. *Stokhasticheskaia optimizatsiia v informatike* [Stochastic Optimization in Informatics], 2009, vol. 5, pp. 157–166.

6. Yakovlev 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 Unmanned Aerial Vehicles Coalitions Operated when there are No-Signals of Global Positioning Systems]. *Chetyrnadtsataia natsionalnaia konferentsiia po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2014* [The 14th National Conf. on Artificial Intelligence with International Participation KII-2014]. Kazan, 2014, vol. 3, pp. 350–358.

7. Yakovlev 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.

8. Norseev S.A., Burov D.A., Tiutiugin D.Iu. K voprosu o kompleksirovaniinavigatsionnoi informatsii v dvukhkanalnoi gibridnoi navigatsionnoi sisteme [On Complexing of Navigation Information in Two Channel Hybrid Navigation System]. *Izvestiia tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula State University. Engineering Sciences], 2020, no. 1, pp. 3–10.

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

10. Vasilev K.K., Korolev L.Iu. Otsenivanie izmeniaiushchikhsia koordinat gruppy avtonomnykh apparatov [Estimation of Varying Coordinates of the Group of Autonomous Vehicles]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2019, no. 3 (57), pp. 86–92.

11. Vasilev K.K., Bobkov A.V. Korolev L.Iu. Opredelenie navigatsionnykh parametrov v gruppe avtonomnykh apparatov [Determination of Navigation Parameters of Autonomous Vehicles in Group]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy* [Information-Measuring and Control Systems], 2020, no. 1, pp. 63–70.

12. Vasilev K.K. *Optimalnaia obrabotka signalov v diskretnom vremeni. Ucheb. posobie* [Optimal Signal Processing in Discrete Time. Textbook]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 288 p.