

Оценивание динамически изменяющихся навигационных параметров группы автономных аппаратов

Л.Ю. Королев¹

¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Большевикская 68, Саранск, Россия, 430005

Аннотация. Проведено комплексирование оценок собственных и взаимных координат и скоростей перемещения автономных аппаратов, движущихся строем. Рассмотрены случаи применения навигационных систем разной точности для произвольного числа аппаратов в группе. Приведены выражения для ковариационных матриц ошибок комплексирования двумя способами. Первый метод сформулирован на основе векторного фильтра Калмана. Второй алгоритм состоит из двухэтапной процедуры оценивания, включающей статическую оценку и фильтр Калмана. Представлены результаты сравнительного анализа эффективности рассмотренных методов.

1. Введение

Актуальной задачей является повышение точности определения навигационных параметров, включающих координаты и скорости перемещения, аппаратов, выполняющих миссии автономно. Особый интерес вызывают групповые действия подводных, наводных, наземных или беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Взаимодействие нескольких устройств, кроме повышения эффективности выполнения задачи, позволяет применять алгоритмы, повышающие точность определения навигационных параметров и управления. Основными источниками данных могут служить инерциальные или спутниковые системы навигации, а также видеонаблюдение. Кроме того, для повышения точности навигации применяют системы, основанные на технологии SLAM (simultaneous localization and mapping), применение маркеров и местных ориентиров, взаимодействие автономных аппаратов по фиксированному каналу связи [1-5]. В работах [6-8] представлены алгоритмы комплексирования данных при одноразовых измерениях собственных и взаимных координат. В [9-11] рассмотрены оценки динамически изменяющихся координат. В данной работе рассмотрены методы решения задач комплексирования навигационных данных, полученных из разных источников, и приведено сравнение эффективности алгоритмов.

2. Постановка задачи

Рассмотрим возможности оптимальной оценки изменяющихся навигационных параметров M аппаратов двумя способами. Первый способ, блок-схема которого представлена на рисунке 1а, заключается в применении векторного фильтра Калмана. Второй способ состоит из этапа совместной статической коррекции наблюдений на каждом шаге фильтрации и последующего квазиоптимального оценивания положения и скорости каждого (l -го) из M аппаратов (рисунок 1б).

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 повторятся с точностью до обозначений. Обозначим номер БПЛА верхним индексом для координат, скоростей, наблюдений, оценок, матриц и других переменных.

Получив навигационные данные от систем определения координат и скоростей, формируются наблюдения собственных z_i^l и z_{vi}^l , взаимных z_i^{kl} и z_{vi}^{kl} координат и скоростей соответственно. После этого в первом случае проводится фильтрация параметров с применением вектора прогноза состояний $\hat{\tilde{x}}_{\varepsilon i}$, на выходе фильтра получаем вектор оптимальных оценок координат и скоростей $\hat{\tilde{x}}_i$. При двухэтапной процедуре после получения оценок координат и скоростей производится статическое комплексирование с применением оптимальных коэффициентов. После этого выделяются координаты \tilde{x}_i^l и скорость \tilde{v}_i^l каждого БПЛА. Набор параметров для каждого БПЛА проходит процедуру калмановской фильтрации с применением прогнозирования $\hat{x}_{\varepsilon i}^1, \hat{v}_{\varepsilon i}^1, \dots, \hat{x}_{\varepsilon i}^l, \hat{v}_{\varepsilon i}^l, \dots, \hat{x}_{\varepsilon i}^M, \hat{v}_{\varepsilon i}^M$. На выходе фильтров получаем оптимальные значения оценок координат и скоростей для каждого из M БПЛА.

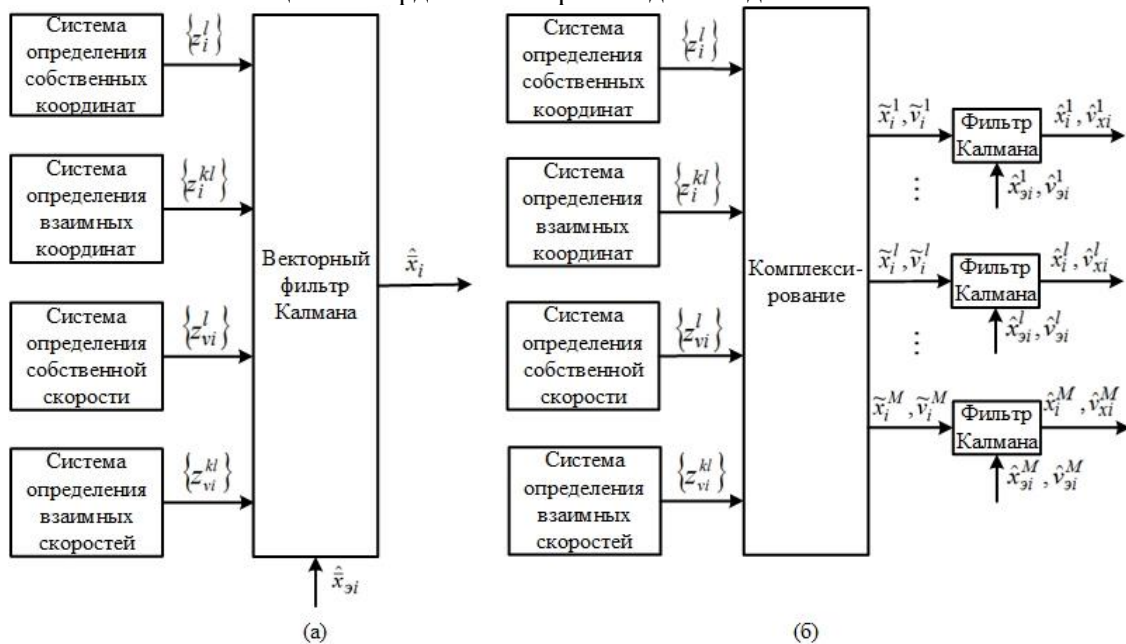


Рисунок 1. Блок-схемы алгоритмов оценивания навигационных параметров с помощью векторного фильтра Калмана (а) и путем скалярного оценивания после статического комплексирования (б).

При помощи математического моделирования проведем анализ эффективности методов и сравним показатели точности оценивания при различных начальных условиях.

3. Векторный фильтр Калмана

Наблюдения за навигационными параметрами группы БПЛА, движущихся строем, включают измерения собственных z_i^l и z_{vi}^l , а также взаимных z_i^{kl} и z_{vi}^{kl} координат и скоростей БПЛА. Наблюдения представляют собой измерение с некоторой погрешностью, так $z_i^l = x_i^l + n_i^l$, $z_i^{kl} = (x_i^k - x_i^l) + n_i^{kl}$, $z_{vi}^l = v_i^l + n_{vi}^l$, $z_{vi}^{kl} = (v_i^k - v_i^l) + n_{vi}^{kl}$, $k \neq l$, $l=1,2,\dots,M$, где n_i^l , n_i^{kl} , n_{vi}^l ,

n_{vi}^{kl} – независимые гауссовские погрешности наблюдений с нулевыми средними и заданными ковариационными матрицами. Наблюдения за собственными навигационными параметрами z_i^l и z_{vi}^l выполняются системами с дисперсиями погрешностей $\sigma_i^{2(l)}$ и $\sigma_{vi}^{2(l)}$, за взаимными координатами и скоростями – z_i^{kl} и z_{vi}^{kl} системами межсамолетной навигации с дисперсиями погрешностей $\sigma_i^{2(kl)}$ и $\sigma_{vi}^{2(kl)}$.

Представим вектор состояния M БПЛА в виде

$$\bar{x}_{pi} = (\bar{x}_i \quad \bar{v}_i)^T,$$

где векторы $\bar{x}_i = (x_i^1 \quad x_i^2 \quad \dots \quad x_i^M)$ и $\bar{v}_i = (v_i^1 \quad v_i^2 \quad \dots \quad v_i^M)$ включают компоненты координаты и скорости каждого аппарата. При этом модели наблюдений представляются как

$$\bar{z}_{xi} = C_x \bar{x}_i + \bar{n}_{xi}, \quad \bar{z}_{vi} = C_v \bar{v}_i + \bar{n}_{vi}$$

или в общем виде

$$\bar{z}_i = C_p \bar{x}_{pi} + \bar{n}_i,$$

где $\bar{z}_i = (\bar{z}_{xi} \quad \bar{z}_{vi})^T$, $\bar{z}_{xi} = (z_{xi}^1 \quad z_{xi}^{12} \quad \dots \quad z_{xi}^{1M} \quad z_{xi}^{21} \quad z_{xi}^2 \quad \dots \quad z_{xi}^{2M} \quad \dots \quad z_{xi}^{M1} \quad z_{xi}^{M2} \quad \dots \quad z_{xi}^M)^T$ и $\bar{z}_{vi} = (z_{vi}^1 \quad z_{vi}^{12} \quad \dots \quad z_{vi}^{1M} \quad z_{vi}^{21} \quad z_{vi}^2 \quad \dots \quad z_{vi}^{2M} \quad \dots \quad z_{vi}^{M1} \quad z_{vi}^{M2} \quad \dots \quad z_{vi}^M)^T$ – векторы наблюдений за координатами и скоростями M БПЛА; $C_x = C_v = C = (M^2 \times M)$ -матрица, определяющая все или часть наблюдаемых компонент векторов состояния координат или скоростей, $C_p = \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix}$; вектор

$\bar{n}_i = (\bar{n}_{xi} \quad \bar{n}_{vi})^T$ включает погрешности наблюдений за координатами $\bar{n}_{xi} = (n_{xi}^1 \quad n_{xi}^{12} \quad \dots \quad n_{xi}^{1M} \quad n_{xi}^{21} \quad n_{xi}^2 \quad \dots \quad n_{xi}^{2M} \quad \dots \quad n_{xi}^{M1} \quad n_{xi}^{M2} \quad \dots \quad n_{xi}^M)^T$ и скоростями $\bar{n}_{vi} = (n_{vi}^1 \quad n_{vi}^{12} \quad \dots \quad n_{vi}^{1M} \quad n_{vi}^{21} \quad n_{vi}^2 \quad \dots \quad n_{vi}^{2M} \quad \dots \quad n_{vi}^{M1} \quad n_{vi}^{M2} \quad \dots \quad n_{vi}^M)^T$ с ковариационными матрицами ошибок наблюдений $M \{\bar{n}_{xi} \bar{n}_{xi}^T\} = V_{nxi}$, $M \{\bar{n}_{vi} \bar{n}_{vi}^T\} = V_{nvi}$, $M \{\bar{n}_i \bar{n}_i^T\} = V_{ni}$.

Уравнение состояния, описывающее динамику изменения параметров в дискретном времени, представим в виде:

$$\bar{x}_{pi} = \wp_i \bar{x}_{pi-1} + G_i \bar{u}_i + \mathcal{G}_i \bar{\xi}_i,$$

где $\wp_i = (2M \times 2M)$ -матрица, описывающая изменение состояния системы в дискретном времени; $G_i = (2M \times 2M)$ -матрица управляющих воздействий $\bar{u}_i = (0 \quad \bar{u}_{vi})^T$, $\bar{u}_{vi} = (u_{vi}^1 \quad u_{vi}^2 \quad \dots \quad u_{vi}^M)^T$; $\mathcal{G}_i = (2M \times 2M)$ -матрица, определяющая влияние последовательности случайных величин $\bar{\xi}_i = (0 \quad \bar{\xi}_{vi})^T$, $\bar{\xi}_{vi} = (\xi_{vi}^1 \quad \xi_{vi}^2 \quad \dots \quad \xi_{vi}^M)^T$ с нулевыми средними и ковариационными матрицами $V_{\xi_i} = \{\bar{\xi}_i \bar{\xi}_i^T\}$.

Элементы вектора \bar{x}_{pi} определяются следующими соотношениями:

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

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

Применим стандартный векторный фильтр Калмана для оценки $\hat{\bar{x}}_{pi}$ навигационных параметров \bar{x}_{pi} :

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

где $\hat{\tilde{x}}_{эpi} = \wp_i \hat{\tilde{x}}_{pi-1}$; $B_i = P_i C_p^T V_{ni}^{-1}$; $P_i = P_{эi} (E + C_p^T V_{ni}^{-1} C_p P_{эi})^{-1}$; $P_{эi} = \wp_i P_{i-1} \wp_i^T + V_{эi}$; E – единичная матрица. Начальные условия фильтрации $\hat{\tilde{x}}_{эp1} = M \{\bar{\tilde{x}}_{p1}\} = 0$, $P_{э1} = M \{\bar{\tilde{x}}_{p1} \bar{\tilde{x}}_{p1}^T\}$ [12].

Среднеквадратические отклонения (СКО) ошибок оценивания координат составят $\sigma_{эi}^l = \sqrt{P_{i(l,l)}^l}$, $l=1,2,\dots,M$. Тогда СКО ошибок оценки скоростей движения БПЛА будут определяться как $\sigma_{эvi}^l = \sqrt{P_{i(M+l,M+l)}^l}$, $l=1,2,\dots,M$.

4. Скалярное оценивание после статического комплексирования

Алгоритм статического комплексирования координат описан в работе [6]. Комплексирование наблюдений за скоростями будет включать аналогичные формулы, что и для координат. Все погрешности наблюдений \bar{n}_i имеют нормальное распределение, тогда наилучшими статическими оценками $\tilde{\tilde{x}}_i = (\tilde{\tilde{x}}_i^1 \tilde{\tilde{x}}_i^2 \dots \tilde{\tilde{x}}_i^M)^T$ координат и $\tilde{\tilde{v}}_i = (\tilde{\tilde{v}}_i^1 \tilde{\tilde{v}}_i^2 \dots \tilde{\tilde{v}}_i^M)^T$ скоростей будут являться линейные комбинации наблюдений на i -ом шаге фильтрации независимо от предыдущих состояний:

$$\begin{pmatrix} \tilde{\tilde{x}}_i \\ \tilde{\tilde{v}}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{z}_{xi} \\ \bar{z}_{vi} \end{pmatrix},$$

где $A_x = (C^T V_{nx}^{-1} C)^{-1} C^T V_{nx}^{-1}$, $A_v = (C^T V_{nv}^{-1} C)^{-1} C^T V_{nv}^{-1}$ – матрицы, содержащие векторы оптимальных коэффициентов для координат и скоростей всех БПЛА. Полученные результаты позволяют найти ковариационные матрицы ошибок оценивания:

$$V_{эxi} = M \left\{ \left(\tilde{\tilde{x}}_i - \bar{\tilde{x}}_i \right) \left(\tilde{\tilde{x}}_i - \bar{\tilde{x}}_i \right)^T \right\} = A_x V_{nxi} A_x^T = (C^T V_{nxi}^{-1} C)^{-1},$$

$$V_{эvi} = M \left\{ \left(\tilde{\tilde{v}}_i - \bar{\tilde{v}}_i \right) \left(\tilde{\tilde{v}}_i - \bar{\tilde{v}}_i \right)^T \right\} = A_v V_{nvi} A_v^T = (C^T V_{nvi}^{-1} C)^{-1},$$

необходимых при построении оптимальных процедур управления и фильтрации вектора изменяющихся параметров. Матрицы $V_{эxi}$ и $V_{эvi}$ имеют вид:

$$V_{эxi} = \begin{pmatrix} D_{xi}^1 & B_{xi}^{12} & \dots & B_{xi}^{1M} \\ B_{xi}^{21} & D_{xi}^2 & \dots & B_{xi}^{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{xi}^{M1} & B_{xi}^{M2} & \dots & D_{xi}^M \end{pmatrix}, V_{эvi} = \begin{pmatrix} D_{vi}^1 & B_{vi}^{12} & \dots & B_{vi}^{1M} \\ B_{vi}^{21} & D_{vi}^2 & \dots & B_{vi}^{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{vi}^{M1} & B_{vi}^{M2} & \dots & D_{vi}^M \end{pmatrix},$$

где D_{xi}^l , $l=1,2,\dots,M$ – дисперсии ошибок статического комплексирования координат l -го БПЛА, D_{vi}^l , $l=1,2,\dots,M$ – дисперсии ошибок статического комплексирования скоростей l -го БПЛА, B_{xi}^{kl}, B_{vi}^{kl} , $k,l=1,2,\dots,M$, $k \neq l$ – взаимные корреляции ошибок. Если не учитывать взаимную корреляцию ошибок, то можно построить относительно простой двумерный фильтр Калмана для раздельного оценивания изменяющихся координат и скоростей каждого из M БПЛА:

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_i^l \\ \hat{v}_i^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_{эi}^l \\ \hat{v}_{эi}^l \end{pmatrix} + P_{ci} \begin{pmatrix} D_{xi}^l & 0 \\ 0 & D_{vi}^l \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{\tilde{x}}_i^l - \hat{x}_{эi}^l \\ \tilde{\tilde{v}}_i^l - \hat{v}_{эi}^l \end{pmatrix},$$

где $P_{ci} = P_{эci} \left(E + C_c^T \begin{pmatrix} D_{xi}^l & 0 \\ 0 & D_{vi}^l \end{pmatrix}^{-1} C_c P_{эci} \right)^{-1}$ – ковариационная (2×2) -матрица ошибок раздельного

оценивания; $C_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. Прогноз оценки состояния и ковариационная матрица ошибок

прогноза примут вид: $\hat{x}_{эi}^l = \hat{x}_{эi-1}^l + T_i \hat{v}_{эi-1}^l$, $\hat{v}_{эi}^l = \hat{v}_{эi-1}^l$, $P_{эci} = \wp_{ci} P_{c(i-1)} \wp_{ci}^T + V_{эci}$.

Тогда СКО оценивания координат каждого из M БПЛА составит $\sigma_{ci}^l = \sqrt{P_{ci(1,1)}^l}$, $l=1,2,\dots,M$, а СКО оценки скоростей $\sigma_{cvi}^l = \sqrt{P_{ci(2,2)}^l}$, $l=1,2,\dots,M$.

5. Сравнение эффективности.

Проанализируем эффективность каждого из рассмотренных методов оценки навигационных параметров группы БПЛА при равных начальных условиях. При применении в группе однотипных БПЛА одинаковы и погрешности измерений собственных и взаимных координат, а также скоростей движения аппаратов.

Тогда можно отметить σ – СКО погрешности системы определения собственных координат, σ_θ – СКО погрешности системы определения взаимных координат, σ_v – СКО погрешности системы определения собственной скорости движения БПЛА, $\sigma_{v\theta}$ – СКО погрешности системы определения взаимных скоростей движения БПЛА.

На рисунке 2 изображены изменения СКО ошибок оценивания координат (2а) и скоростей (2б) БПЛА в дискретном времени при нулевых значениях внешних воздействий и ошибок определения взаимных координат и скоростей, а также при достаточно сильных внешних воздействиях и погрешностях систем межсамолетной навигации близких к погрешности автономных датчиков. В качестве начальных условий принято $M=10$, $\sigma=10$ м, $\sigma_v=1$ м/с, $v_i^l=10$ м/с.

Здесь и далее приведено сравнение алгоритмов прямой калмановской фильтрации с учетом оценок собственных и взаимных скоростей (сплошная линия) и без учета наблюдений за скоростями (штрихпунктирная линия), квазиоптимальной двухэтапной процедуры с учетом оценок скоростей (штриховая линия) и без наблюдений за скоростями (пунктирная линия).

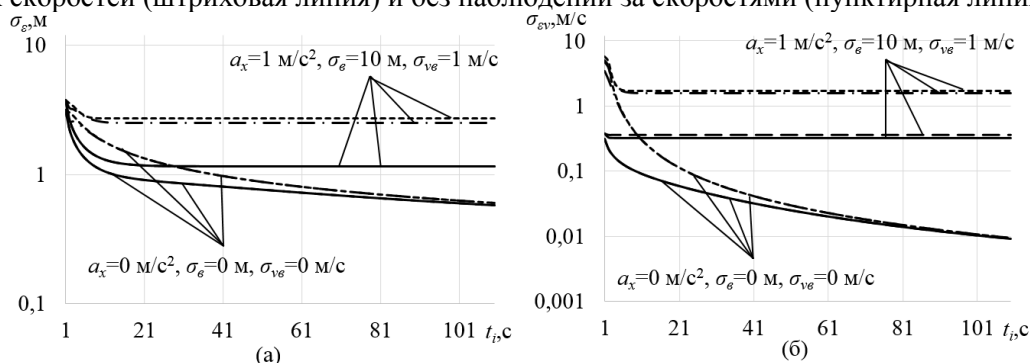


Рисунок 2. Изменение СКО ошибки оценивания координат (а) и скоростей (б) БПЛА в дискретном времени.

На представленных графиках очевидно, что применение точных систем межсамолетной навигации, для определения взаимных координат и скоростей, значительно снижает погрешность определения как местоположения так и скорости перемещения БПЛА. Кроме того, по рисункам видно, что эффективность рассмотренных алгоритмов оценки координат сравнивается при применении в процедуре комплексирования наблюдений за собственными и взаимными скоростями, а также при использовании точных систем определения взаимных навигационных параметров. При оценке скоростей перемещения БПЛА эффективность алгоритмов совпадает только при применении систем межсамолетной навигации высокой точности. Изменяясь во времени СКО стремятся к некоторому установившемуся значению. Последующие графики будем строить с учетом таких установившихся значений при $t_i=100$ с.

Рассмотрим зависимости ошибок фильтрации от точности определения межсамолетных навигационных параметров с учетом оценок собственных и взаимных скоростей и без таких наблюдений при нулевом и высоком уровне воздействия внешних возмущений. На рисунке 3

изображены зависимости СКО ошибок оценки координат (3а) и скоростей (3б) от точности измерений взаимных координат группы БПЛА. Рисунок 4 включает зависимости СКО ошибок оценки координат (4а) и скоростей (4б) от точности измерения взаимных скоростей движения группы автономных аппаратов. В качестве начальных условий примем $M = 10$, $\sigma = 10$ м, $\sigma_v = 1$ м/с, $v_i^l = 10$ м/с. На рисунке 3 приведены зависимости при $a_x = 1$ м/с², $\sigma_{v_g} = 1$ м/с. На рисунке 4 применены условия $a_x = 1$ м/с², $\sigma_g = 1$ м/с. В случаях применения тех же алгоритмов при значениях $a_x = 0$ м/с², $\sigma_{v_g} = 0$ м/с и $\sigma_g = 0$ м/с графики зависимостей практически совпадают, показывая меньшее значение СКО ошибок фильтрации по отношению к большим погрешностям и помехам..

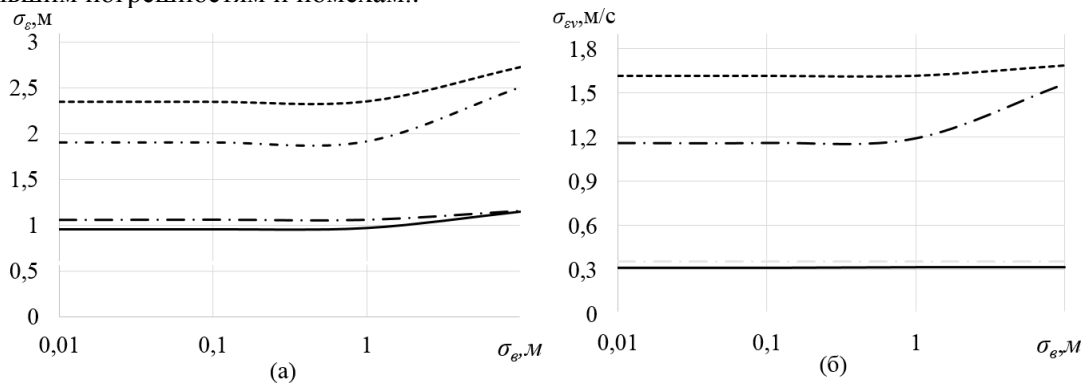


Рисунок 3. Зависимости СКО ошибок фильтрации от СКО определения взаимных координат.

Анализ графиков на рисунках 2-4 показывает, что при низком уровне воздействия внешних возмущений и применении систем межсамолетной навигации высокой точности эффективность рассматриваемых методов практически одинакова. Небольшое ухудшение показателей точности наблюдается у алгоритмов без использования наблюдений за скоростями при применении малоточных систем измерения взаимных координат (рисунок 3). Согласно графикам на рисунке 2 различия между рассматриваемыми подходами при использовании точных систем межсамолетной навигации и отсутствием внешних помех заключаются во времени сходимости графиков. Так, в алгоритмах, учитывающих наблюдения за скоростями перемещения, снижение СКО погрешности оценивания происходит быстрее. При этом отсутствует заметная разница между эффективностью метода векторной фильтрации и эффективностью метода с предварительным статическим комплексированием.

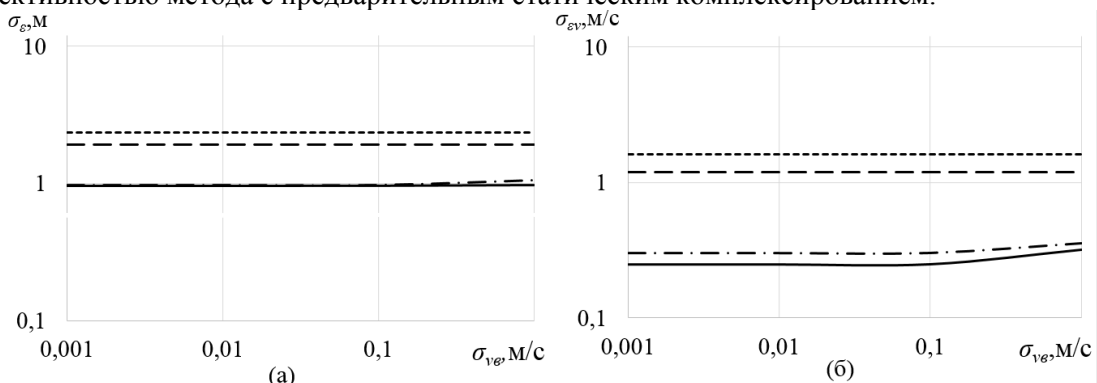


Рисунок 4. Зависимости СКО ошибок фильтрации от СКО определения взаимных скоростей.

В случаях применения малоточных систем межсамолетной навигации и при повышении уровня воздействия внешних возмущений на рисунках 2-4 очевидна разница между эффективностью алгоритмов. Методы оценки, включающие наблюдения за скоростями, значительно эффективнее способов обработки навигационной информации, состоящих только из наблюдений за координатами. Кроме того очевидны достаточно близкие значения СКО

погрешности оценивания в векторном и скалярном методах, включающих наблюдения за скоростью перемещения группы аппаратов, как при оценке координат так и при оценке скоростей БПЛА.

Зависимости СКО фильтрации от величины влияния внешних помех представлены на рисунке 5. При начальных условиях $\sigma = 10\text{ м}$, $\sigma_v = 1\text{ м/с}$, $\sigma_g = 1\text{ м}$, $\sigma_{vg} = 0,1\text{ м/с}$, $v_i^l = 10\text{ м/с}$ рассмотрены зависимости при оценке координат (5а) и скоростей (5б) для разного количества БПЛА в группе.

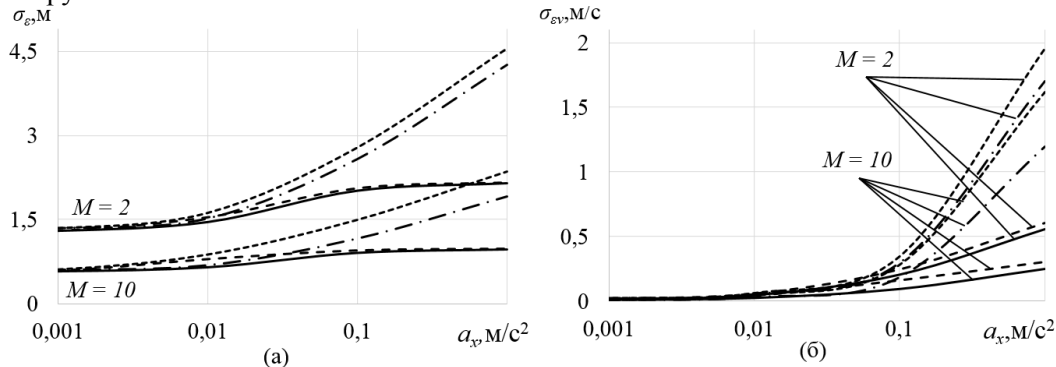


Рисунок 5. Зависимости СКО ошибок оценивания от величины воздействия внешних помех.

Из приведенных графиков следует, что при увеличении внешних возмущающих воздействий снижается точность оценок навигационных параметров БПЛА. Однако применение алгоритмов с учетом наблюдений за скоростями движения группы аппаратов значительно повышает точность комплексирования в сравнении с эффективностью оценок без применения показателей скоростей. Кроме того СКО погрешности при оценивании методом векторного фильтра Калмана ниже ошибок, получаемых при скалярном комплексировании. Также значительное повышение точности оценки навигационных параметров достигается увеличением числа БПЛА в группе.

На рисунке 6 представлены графики зависимостей СКО ошибки комплексирования от количества БПЛА в строю. Оценку координат (6а) и скоростей (6б) летательных аппаратов будем производить при учете показателей точности реальных систем определения навигационных параметров. При моделировании применялись система определения собственных координат и скоростей GPS с показателями СКО ошибки измерения $\sigma = 10\text{ м}$, $\sigma_v = 3\text{ м/с}$; для определения взаимных координат – система межсамолетной навигации СИНТЕЛА с точностью измерений 1 метр; для определения взаимных скоростей – система ДИСС-15 на основе многолучевого доплеровского измерителя скорости с точность измерения $\sigma_{vg} = 0,4\text{ м/с}$. При этом учитывалось $a_x = 0,1\text{ м/с}^2$, $v_i^l = 10\text{ м/с}$, $t_i = 100\text{ с}$, $T_i = 1\text{ с}$.

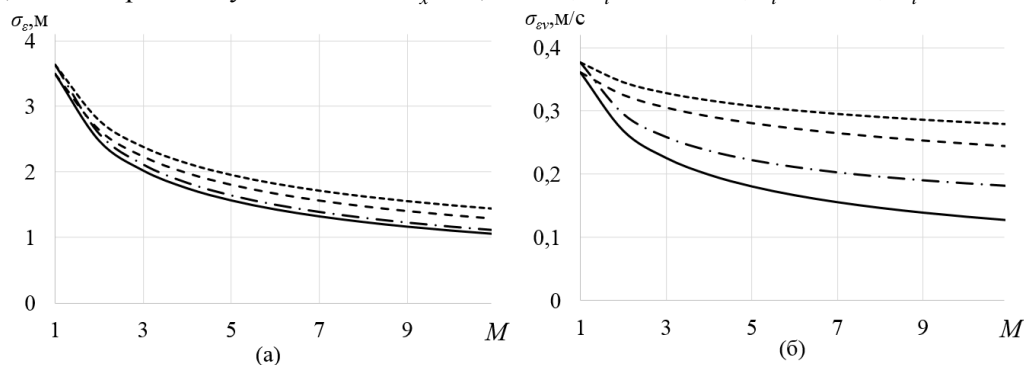


Рисунок 6. Зависимости СКО ошибок фильтрации от количества БПЛА в группе.

Графики отображают значительное повышение точности оценивания навигационных параметров БПЛА при увеличении числа аппаратов в строю как при учете наблюдений за

взаимными скоростями, таки без учета таких параметров. При сравнении методов оценивания преимуществом обладает метод с применением векторного фильтра Калмана.

Анализ графиков на рисунках 5 и 6 показывает снижение СКО погрешности фильтрации при увеличении числа аппаратов, взаимодействующих в группе. Кроме того, значительное влияние на точность оценки координат и скоростей оказывают внешние возмущения, действующие на БПЛА во время движения. Сравнение вариантов состава навигационных параметров и применяющих их алгоритмов показало повышение точности оценивания при добавлении в процедуру наблюдений данных о собственных и взаимных скоростях перемещения БПЛА, а также преимущество в эффективности оценки координат и скоростей векторным фильтром Калмана.

Сравним рассматриваемые методы по величине вычислительных затрат. Предположим, что расчет навигационных параметров для всех БПЛА производится на одном «ведущем» устройстве. На рисунке 7 представлен график зависимости затраченного на вычисление оценок времени t_a от количества БПЛА, данные которых обрабатываются. Оценку времени вычисления будем производить для 100 наблюдений ($t_i = 100$) на одном вычислительном устройстве при одинаковых начальных условиях.

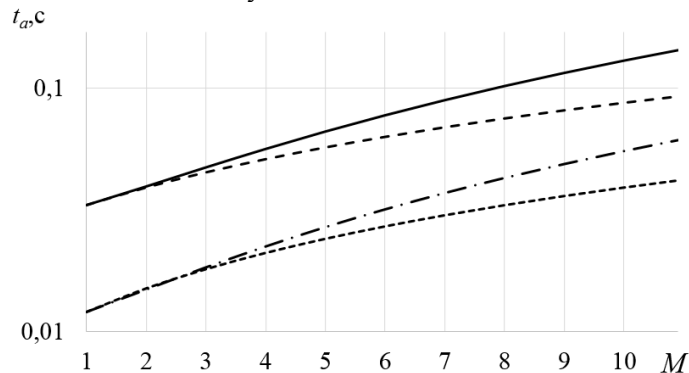


Рисунок 7. Зависимость времени вычисления оценок от количества БПЛА.

На графике очевидно преимущество метода скалярного оценивания после статического комплексирования при увеличении числа БПЛА в группе. При этом алгоритмы, использующие измерения собственных и взаимных скоростей перемещения БПЛА, требуют большего времени на комплексную обработку параметров.

6. Заключение

Анализ методов и алгоритмов оценки навигационных параметров БПЛА, движущихся строем, показал, что при добавлении наблюдений за собственными и взаимными скоростями перемещения БПЛА происходит значительное повышение точности определения навигационных параметров, чем в случаях применения наблюдений только за координатами аппаратов. Наибольшая эффективность фильтрации достигается при применении точных систем определения собственных и взаимных навигационных параметров БПЛА. Увеличение количества летательных аппаратов в группе также приводит к росту эффективности алгоритмов. Анализ эффективности методов комплексирования отображает преимущество фильтрации с применением векторного фильтра Калмана, при этом, метод скалярного оценивания после статического комплексирования имеет преимущество по показателям затраченных ресурсов на вычисление оценок.

7. Литература

- [1] Яковлев, К.С. Распределенная система управления коалициями беспилотных летательных аппаратов, функционирующих в условиях отсутствия сигналов глобальных навигационных систем / К.С. Яковлев, В.В. Хитьков, А.В. Петров, М.И. Логинов //

- Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. – 2014. – Т. 3. – С. 350-358.
- [2] Яковлев, К.С. Система навигации группы БЛА на основе маркеров / К.С. Яковлев, В.В. Хитьков, М.И. Логинов, А.В. Петров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – Т. 4, № 5. – С. 44-48.
- [3] Васильев, К.К. Динамическое использование ориентиров для оценки координат автономных необитаемых подводных аппаратов / К.К. Васильев, А.В. Бобков // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – Т. 12. – С. 11-15.
- [4] Ефанов, В.Н. Управление полетом БПЛА в строю на основе координации взаимодействия группы летательных аппаратов / В.Н. Ефанов, С.В. Мизин, В.В. Неретна // Вестник УГАТУ, Математика. – 2014. – Т. 1, № 62. – С. 114-121.
- [5] Амелин К.С. 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] Васильев, К.К. Совместная оценка координат группы автономных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т. 11. – С. 56-60.
- [7] Васильев, К.К. Комплексирование оценок координат группы автономных аппаратов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем, 2018. – С. 151-155.
- [8] Васильев, К.К. Применение статистических методов при проектировании корабельных систем связи и автоматического управления движением // Автоматизация процессов управления. – 2011. – Т. 1, № 23. – С. 72-77.
- [9] Васильев, К.К. Динамическое оценивание координат группы беспилотных летательных аппаратов / К.К. Васильев, Л.Ю. Королев // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – 2019. – Т. 3. – С. 412-418.
- [10] Васильев, К.К. Способы динамического оценивания координат для повышения точности навигации группы БПЛА / К.К. Васильев, Л.Ю. Королев // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2019, 2019. – С. 70-75.
- [11] Васильев, К.К. Оценивание изменяющихся координат группы автономных аппаратов / К.К. Васильев, Л.Ю. Королев // Автоматизация процессов управления. – 2019. – Т. 3, № 57. – С. 86-92.
- [12] Васильев, К.К. Оптимальная обработка сигналов в дискретном времени: учебное пособие / К.К. Васильев – М.: Радиотехника, 2016. – 288 с.

Estimation of dynamically changing navigation parameters of the group of autonomous vehicles

L.Y. Korolev¹

¹National Research Mordovia State University, Bolshevik Str. 68, Saransk, Russia, 430005

Abstract. The estimates of natural and mutual coordinates and speeds of movement of autonomous vehicles moving the structure have been integrated. Cases of application of navigation systems of different accuracy for arbitrary number of sets in group are considered. There are given expressions for covariance matrices of complex errors in two ways. The first method is formulated based on a Kalman vector filter. The second algorithm consists of a two-step evaluation procedure involving a static evaluation and a Kalman filter. Results of comparative analysis of efficiency of the considered methods are presented.