

Критерии селективного выбора наиболее достоверного источника информации в измерительных комплексах

© А.Ю. Радюкин, А.Л. Масленников

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Рассмотрены критерии селективного выбора наиболее достоверного источника информации о состоянии летательного аппарата в составе измерительного комплекса. Используется тестовая математическая модель измерительного комплекса, состоящая из основанных на различных физических принципах функционирования измерительных систем трех типов, формирующих различный набор оцениваемых элементов вектора состояния летательного аппарата. Комплексование информации о состоянии объекта осуществляется федеративным фильтром Калмана. В качестве критериев выбора наиболее достоверного источника информации о состоянии летательного аппарата рассматриваются нормы ковариационных матриц ошибок оценивания, формируемые локальными фильтрами Калмана, а также дисперсии измерений каждого оцениваемого элемента вектора состояния объекта в отдельности всеми измерительными средствами. Результаты моделирования показывают принципиальную применимость каждого из рассмотренных критериев к выбору наиболее достоверного источника информации.

Ключевые слова: критерии комплексования, федеративный фильтр Калмана, фильтр Калмана, измерительные комплексы, измерительные системы, комплексование информации

Введение. Измерительные комплексы (ИК) представляют собой объединение сложных аппаратных, программных и информационных систем, цель которых — измерение и оценка различных характеристик объектов, например летательных аппаратов (ЛА). Основная задача алгоритмической части ИК заключается в комплексовании информации, поступающей от измерительных систем (ИС), входящих в состав ИК. Использование данных от каждого источника информации (каждой ИС) по отдельности, как правило, дает низкие точность и надежность оценки элементов вектора состояния объекта, поэтому целесообразно применять методы комплексования информации от нескольких источников [1, 2].

В настоящее время существуют разнообразные подходы к решению задачи комплексования информации от нескольких источников информации: фильтры Калмана различного вида, нейронные сети, фильтр частиц, нечеткая логика и др. [3–6]. Часть таких подходов требует существенных вычислительных ресурсов для решения задачи, и, следовательно, их нельзя применять в системах с требованием функционирования в режиме реального времени или близкого к этому режиму. Один из возможных достаточно вычислительно эффективных подходов — использование селективного механизма комплексования

информации на основе федеративного фильтра Калмана, однако для его применения к рассматриваемой задаче необходимо сформировать соответствующие критерии принятия решения [7, 8].

Рассматривается тестовая математическая модель ИК, которая включает в себя ИС трех видов, предоставляющих различные наборы оцениваемых компонент вектора состояния объекта — ЛА, по его тестовой математической модели, имеющей три элемента в векторе состояния, а также описание селективного подхода комплексирования информации от нескольких ИС по разным критериям. Математическая модель каждого ИС оценивает вектор состояния объекта с учетом заданных особенностей функционирования и моделей ошибок, построенных из предположений о различных физических особенностях функционирования соответствующих ИС.

Цель данной работы — рассмотреть и сравнить два критерия селективного выбора наиболее достоверного источника информации об элементах вектора состояния объекта, в качестве которого можно рассматривать летательный аппарат, с применением селективного метода комплексирования информации на основе федеративного фильтра Калмана.

Тестовая математическая модель измерительного комплекса.

Функциональная схема рассматриваемого ИК представлена на рис. 1. В качестве входной информации для тестовой математической модели каждой ИС используются истинные значения вектора состояния объекта, формируемые тестовой математической моделью самого объекта.

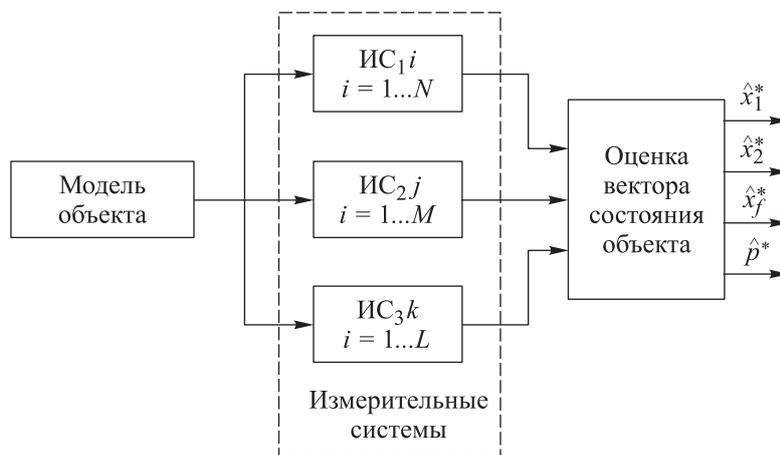


Рис. 1. Функциональная схема измерительного комплекса:

\hat{x}_i^* — оценка i -го вектора состояния объекта; f — количество оцениваемых каждой измерительной системой (ИС) элементов в векторе состояния; \hat{p}^* — оценка надежности полученных оценок состояний; N — количество ИС₁; M — количество ИС₂; L — количество ИС₃

Тестовая математическая модель каждой ИС формирует свой набор данных о состоянии объекта и надежность (точность) получения оценок вектора состояния объекта или отдельных его компонент.

Рассматривается объект, имеющий три оцениваемых элемента вектора состояния: ИС₁ позволяет оценить все три элемента, ИС₂ — два, ИС₃ — только один. Оценка каждого элемента вектора состояния проводится в некоторых условных единицах.

Тестовая математическая модель ошибок измерений измерительной системы. На точность измерений ИС существенное влияние оказывают условия работы. Учет их влияния на работу ИС моделируется упрощенно в виде постепенного увеличения уровня измерительных шумов в каждой ИС в соответствии с выражением для ковариационной матрицы измерительных шумов:

$$\mathbf{R}_k^i = q\mathbf{R}_{исх}^i. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{R}_k^i — ковариационная матрица измерительных шумов ИС_i на k -м шаге; $\mathbf{R}_{исх}^i$ — исходная ковариационная матрица измерительных шумов ИС_i; q — коэффициент усиления шумов, формируемый соотношением

$$q = \min\left(q_{\max}, e^{0,07(t-t_{\text{нач}})}\right), \quad (2)$$

где q_{\max} — максимальное значение коэффициента усиления шумов; $t_{\text{нач}}$ — момент начала влияния шумов на измерения, с.

Алгоритм комплексирования данных с использованием федеративного фильтра Калмана. Рассматривается селективный механизм комплексирования на основе федеративного фильтра Калмана, для которого информация о состоянии объекта от каждой ИС, входящей в состав ИК, предварительно обрабатывается локальным фильтром Калмана (ЛФК), в качестве которого используется линейный фильтр Калмана [9]. Линейный фильтр Калмана строится для системы вида

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k; \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \end{cases} \quad (3)$$

где \mathbf{x}_k — вектор состояния объекта; \mathbf{A}_k — матрица состояния; \mathbf{w}_k — входные шумы; \mathbf{y}_k — вектор измерений; \mathbf{C}_k — матрица измерений; \mathbf{v}_k — измерительные шумы.

Фильтр состоит из этапов априорной оценки (этап прогноза) и апостериорной оценки (этап коррекции). Для рассматриваемой задачи

вектор состояния \mathbf{x}_k , а также матриц \mathbf{A}_k и \mathbf{C}_k для каждой из ИС имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{ИС}_1: \mathbf{x}_k &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ \text{ИС}_2: \mathbf{x}_k &= \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ \text{ИС}_3: \mathbf{x}_k &= [x_2], \mathbf{A}_k = [1], \mathbf{C}_k = [1]. \end{aligned} \quad (4)$$

На этапе прогноза формируются оценки:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}; \\ \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_{n|m}$ — априорная оценка в момент времени n по $m < n$ измерениям; $\mathbf{P}_{n|m}$ — априорная ковариационная матрица ошибок оценивания; \mathbf{Q}_k — ковариационная матрица входных шумов.

На этапе коррекции проводятся следующие вычисления:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_k &= \mathbf{y}_k - \mathbf{C}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}; \\ \mathbf{S}_k &= \mathbf{C}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}_k^T + \mathbf{R}_k; \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}_k^T \mathbf{S}_k^{-1}; \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k; \\ \mathbf{P}_{k,k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_k)^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ — апостериорная оценка состояния в момент времени k ; \mathbf{R}_k — ковариационная матрица измерительных шумов; $\mathbf{P}_{k|k}$ — апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания [10]; \mathbf{I} — единичная матрица соответствующей размерности.

Схема комплексирования показана на рис. 2.

Критерии селективного выбора наиболее достоверного источника информации. Полученные ЛФК оценки векторов состояний объекта по информации от каждой ИС поступают в мастер-фильтр, где в соответствии с используемым критерием принимается решение о том, какой источник информации (какая ИС) предоставляет наиболее достоверные данные. Рассмотрим следующие критерии селективного выбора.

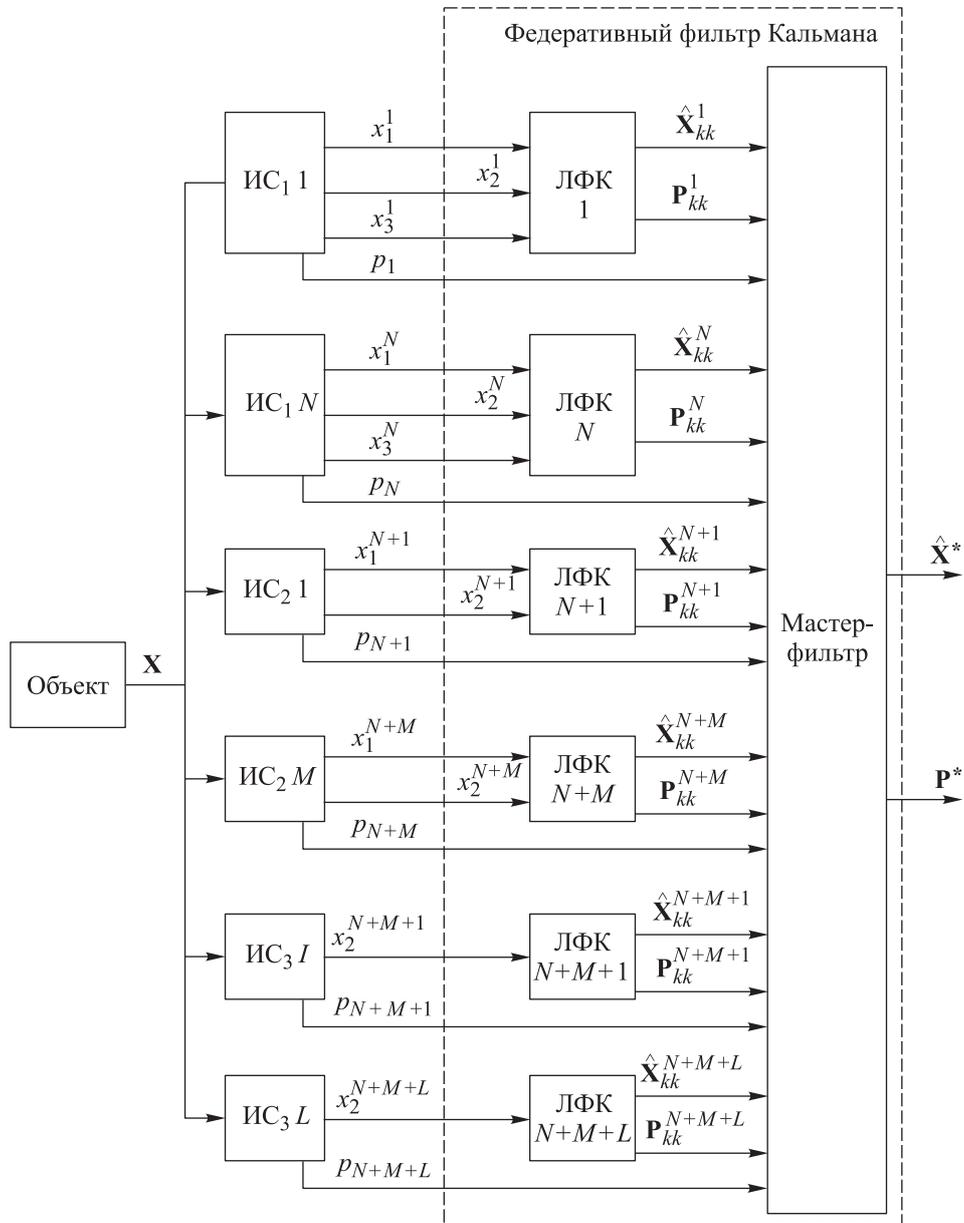


Рис. 2. Схема комплексирования:

x_i^j — значения i -го элемента вектора состояния, формируемые ИС _{j} ; X — истинный вектор состояния объекта, формируемый по своей математической модели; \hat{X}_{kk}^i — оценка, полученная i -м ЛФК; P_{kk}^i — апостериорная ковариационная матрица, полученная i -м ЛФК;
 \hat{X}^* и P^* — оценки, принятые в качестве наиболее достоверных

След ковариационной матрицы оценок. В качестве наиболее распространенного критерия селективного выбора источника информации можно принять значение минимума следа ковариационной матрицы оценок, полученного с помощью ЛФК:

$$J = \min_i \text{tr}(\mathbf{P}_{k|k}^i), \quad i = 1 \dots T, \quad (7)$$

где J — значение критерия; $\text{tr}(\cdot)$ — след матрицы; а T — общее количество ИС, используемых в конфигурации измерительного комплекса [11, 12].

Данный критерий несколько некорректно использовать в случае, когда разные типы ИС представляют разный набор измеряемых данных, как в рассматриваемой задаче, поскольку в этом случае матрицы \mathbf{P} на выходе ЛФК будут иметь разные размерности. Если в качестве самого достоверного источника будет выбрана, например, ИС₃, которая формирует данные только об x_2 вектора состояния объекта, то данные об элементах x_1 и x_3 вектора состояния объекта будут потеряны.

Дисперсия отдельных измерений. С использованием данного критерия выбор наиболее достоверного источника информации об элементах вектора состояния объекта для каждого из них в отдельности осуществляется с учетом дисперсий, полученных (из диагональных элементов ковариационных матриц ошибок) следующим образом:

$$\begin{aligned} J_1 &= \min_i \sigma_1^i, \quad i = 1 \dots N; \\ J_2 &= \min_i \sigma_2^i, \quad i = 1 \dots N + M; \\ J_3 &= \min_i \sigma_3^i, \quad i = 1 \dots N + M + L, \end{aligned} \quad (8)$$

где J_j — значение критерия для j -го элемента вектора состояния; σ_j^i — дисперсии оценки j -го элемента вектора состояния, полученные ИС _{i} .

Таким образом, в результате применения данного критерия выбираются отдельно самые достоверные источники данных для каждого элемента вектора состояния объекта.

Применение критериев селективного выбора при разных условиях работы измерительного комплекса. Были проведены вычислительные эксперименты в среде научных вычислений MathWorks MATLAB, которые заключались в оценке вектора состояния объекта каждой ИС и решении задачи комплексирования в соответствии с рассмотренными критериями. Представим подробно процедуру моделирования и формирования наиболее достоверных оценок вектора

состояния объекта с рассмотренным селективным методом комплексирования информации.

Комплексирование информации при отсутствии ошибок измерений. В рамках данного эксперимента селективный механизм комплексирования применялся при отсутствии ошибок измерений ИС₁, ИС₂ или ИС₃. Для сравнения результаты комплексирования с использованием двух критериев представлены на рис. 3. Осуществление выбора наиболее достоверных источников для оцениваемых элементов вектора состояния продемонстрировано на рис. 4. На графике для каждой ИС приведены моменты выбора источника информации в качестве наиболее достоверного, что соответствует высокому уровню показанного сигнала. На рис. 3 и 4 также продемонстрировано соответствие четырех интервалов, когда в качестве наиболее достоверного источника информации о состоянии объекта выбираются оценки из соответствующих ИС. Полученные ошибки измерений для каждой ИС и каждого критерия выбора проиллюстрированы на рис. 5.

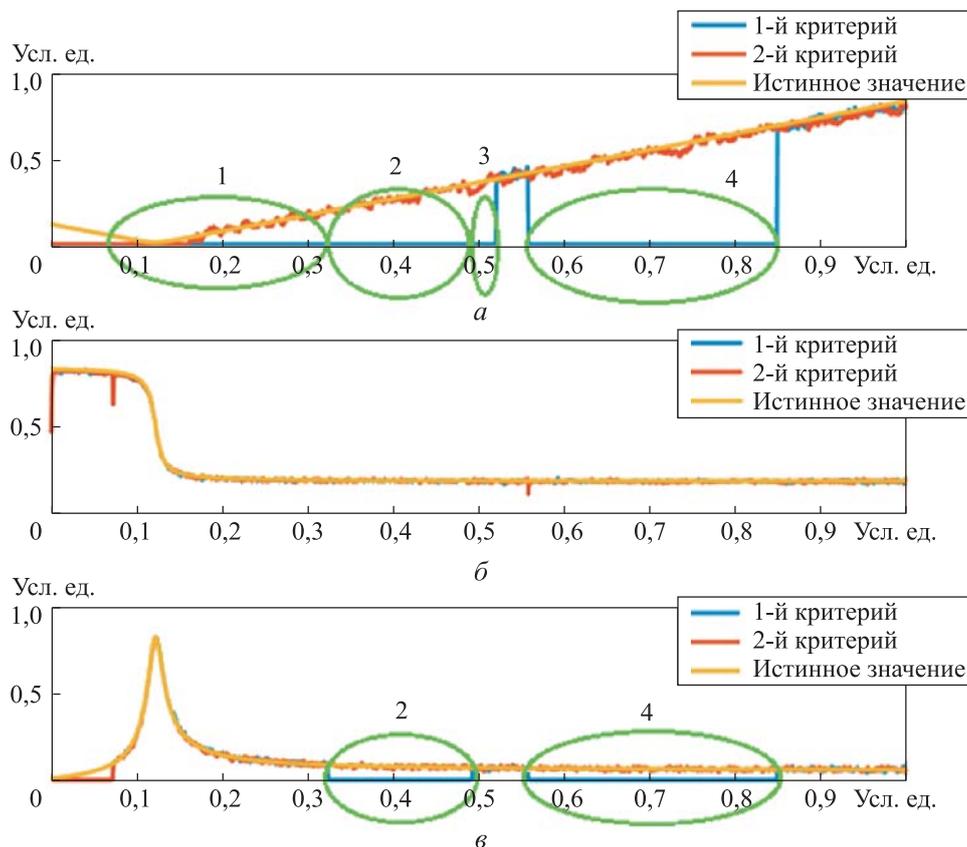


Рис. 3. Результаты комплексирования при отсутствии влияния внешних факторов для x_1 (а), x_2 (б), x_3 (в)

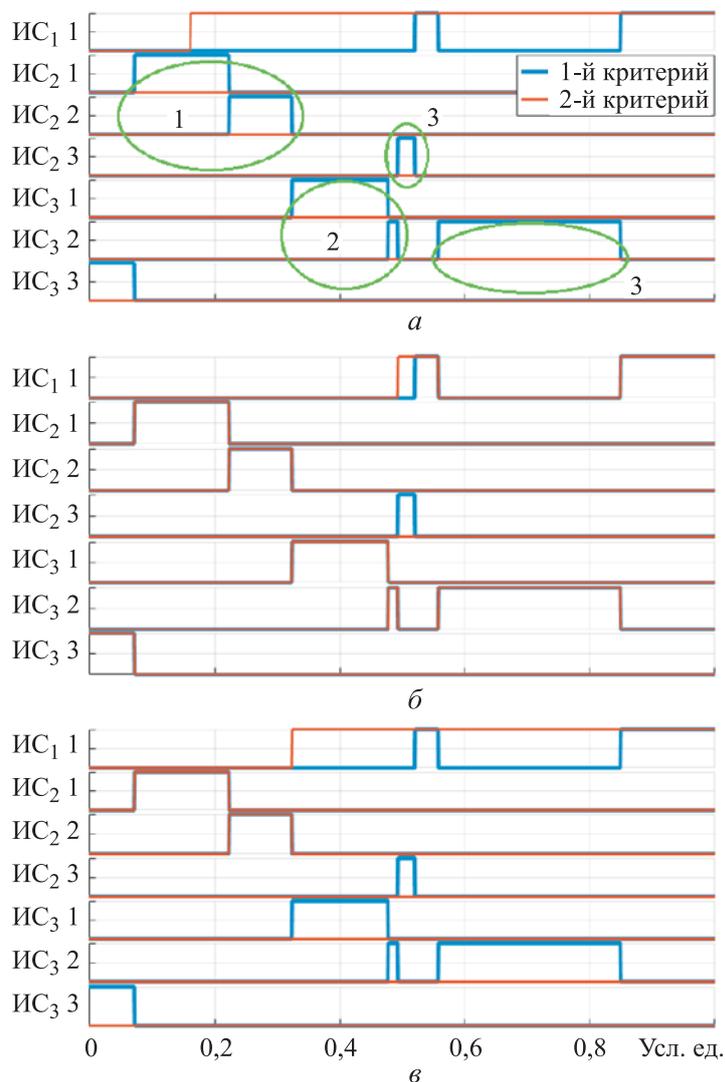


Рис. 4. Результаты выбора наиболее достоверных источников по каждому параметру при отсутствии влияния внешних факторов для x_1 (а), x_2 (б), x_3 (в)

По результатам, представленным на рис. 3 и 4, можно сделать вывод, что применение первого критерия селективного выбора информации приводит к потерям данным, так как на некоторых участках выбирается источник информации, в котором не содержится информации об x_1 и/или x_3 (если выбирается ИС₂ на участках 1 и 3, то отсутствуют измерения x_3 , в случае выбора ИС₃ на участках 2, 4 — измерения x_1 и x_3). В результате этого первый критерий в большинстве случаев имеет большую ошибку оценки параметров по сравнению со вторым критерием, что можно заметить на рис. 5.

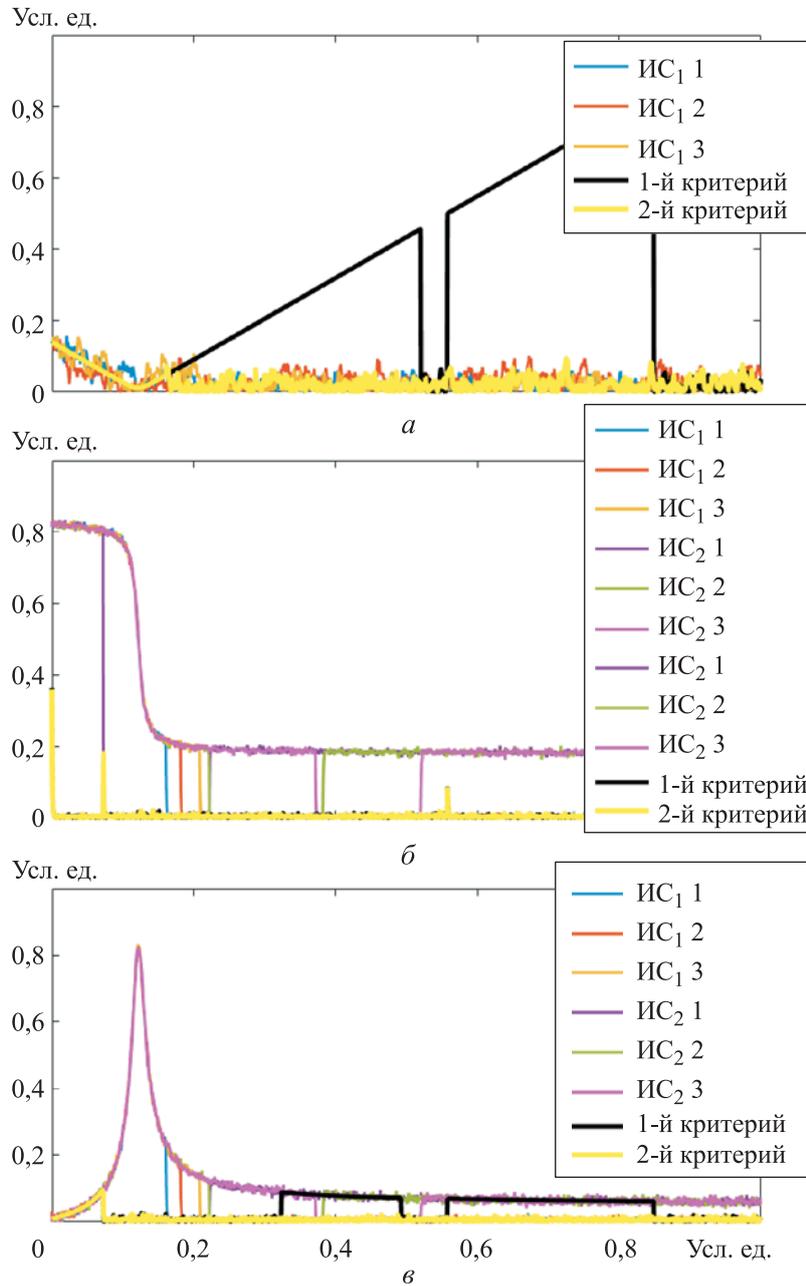


Рис. 5. Ошибки оценки каждого параметра при отсутствии влияния внешних факторов для x_1 (а), x_2 (б), x_3 (в)

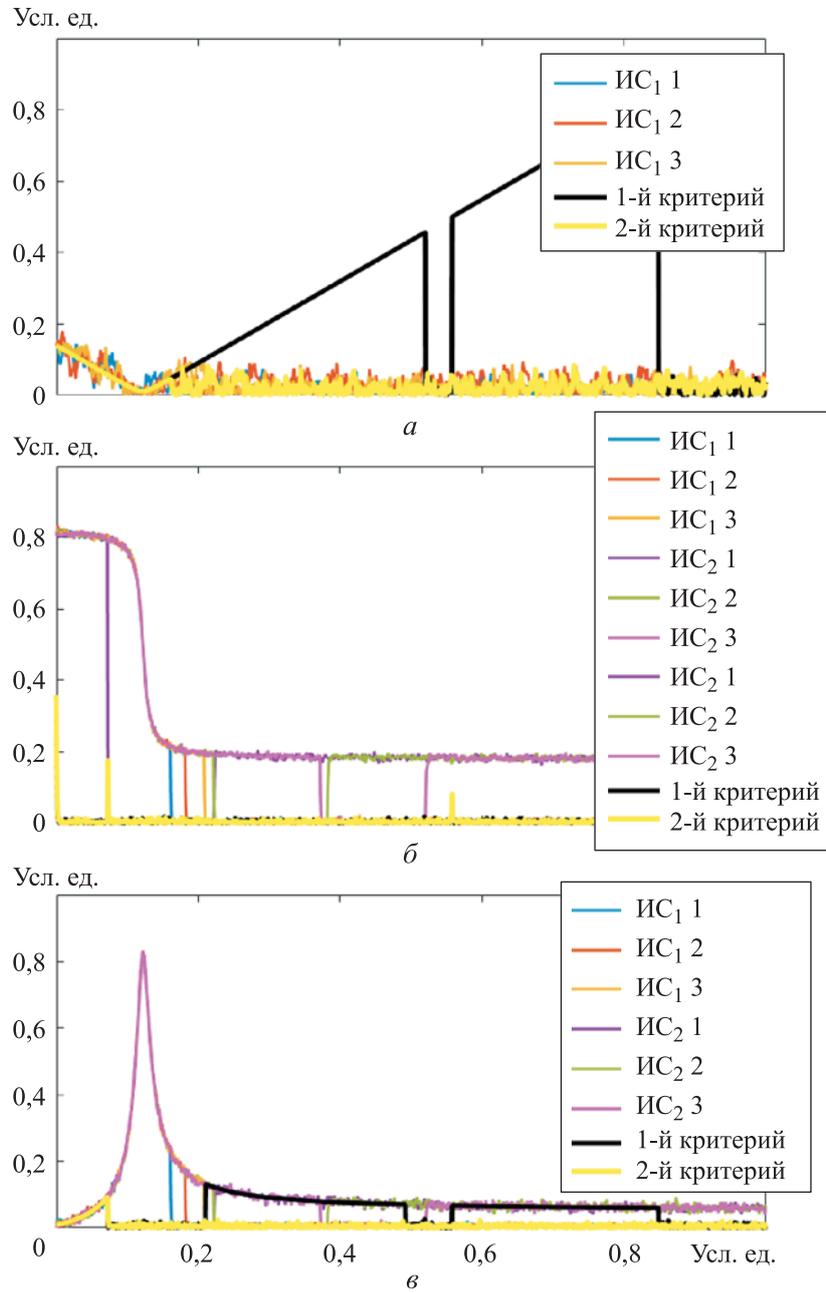


Рис. 6. Ошибки оценки каждого параметра при зашумлении данных ИС₂ для x_1 (а), x_2 (б), x_3 (в)

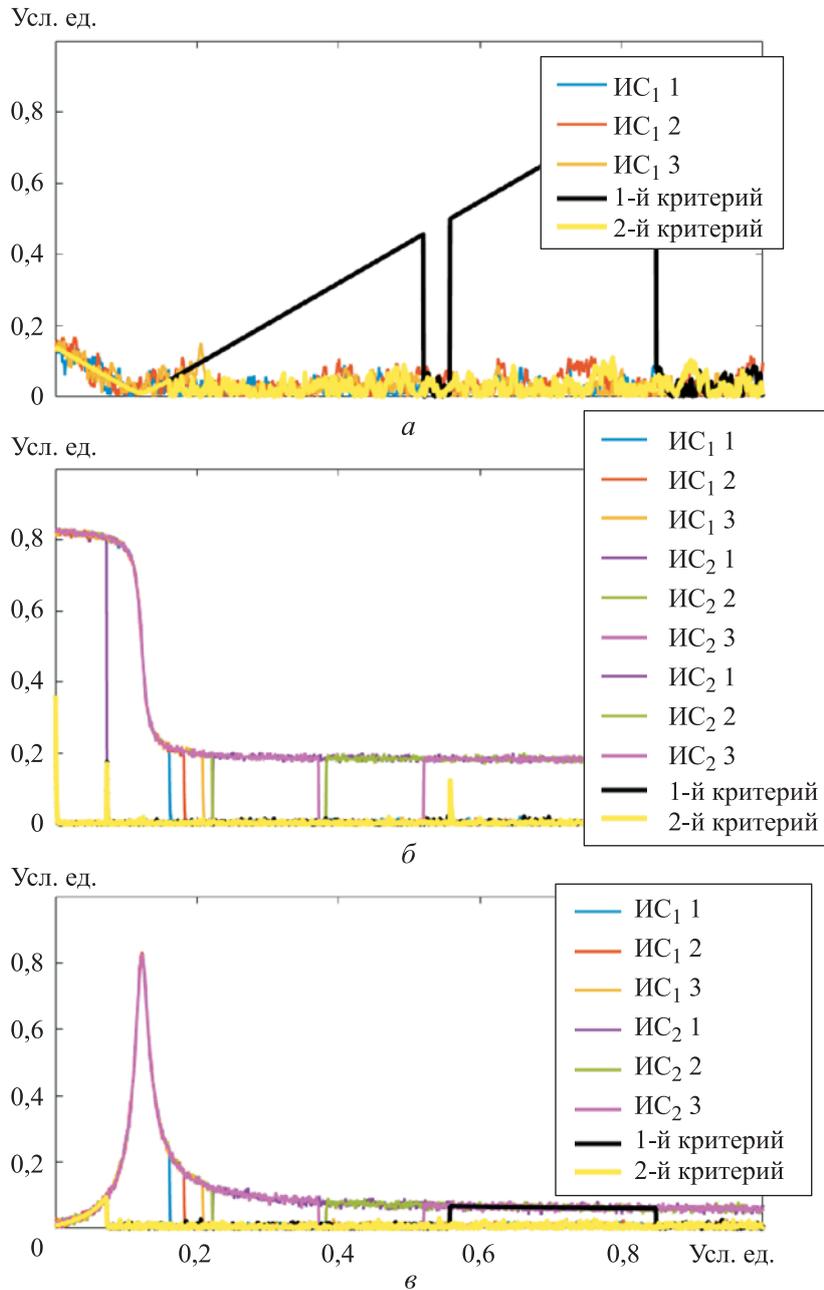


Рис. 7. Ошибки оценки каждого параметра при зашумлении данных ИС₁ и ИС₃

Другими словами, на рис. 5 показаны величины ошибок оценки векторов состояния различными ИС. Отчетливо видно, что различные ИС дают разную ошибку определения элементов вектора состояния объекта, а с помощью рассмотренного метода комплексирования при использовании второго критерия можно на протяжении работы всего измерительного комплекса определять элементы вектора состояния

с наименьшей ошибкой на текущем интервале. С применением первого критерия решение задачи становится невозможным. Можно также отметить, что в целом применение комплексирования позволяет уменьшить ошибку измерения параметров, так как полученные в результате комплексирования ошибки меньше, чем ошибки измерения большинства ИС в отдельности.

Комплексирование информации при учете ошибок измерений ИС₂. Проведем моделирование ситуации, при которой возникает увеличение уровня зашумленности данных от ИС₂ в соответствии с соотношением (8). Величины ошибок оценки векторов состояния различными ИС показаны на рис. 6. Можно заметить, что применение второго критерия при данных условиях также позволяет определять элементы вектора состояния с наименьшей ошибкой на протяжении работы всего измерительного комплекса. В то же время ошибка оценки определения элементов вектора состояния объекта при применении первого критерия стала больше по сравнению с результатами, приведенными на рис. 5, что можно видеть на графике ошибки x_3 .

Комплексирование информации при учете ошибок измерений ИС₁ и ИС₃. В рамках данного эксперимента моделируется ситуация, при которой возникает увеличение уровня зашумленности данных от ИС₁ и ИС₃ в соответствии с соотношением (1). Величины ошибок оценки векторов состояния различными ИС показаны на рис. 7. Можно отметить, что применение второго критерия, как и в предыдущих двух экспериментах, позволяет определять элементы вектора состояния с наименьшей ошибкой на протяжении работы всего ИК. В то же время ошибка оценки определения элементов вектора состояния объекта при применении первого критерия остается существенно больше.

Закключение. На примере летательного аппарата в составе алгоритмов функционирования измерительного комплекса в работе рассмотрены критерии селективного выбора наиболее достоверного источника информации о векторе состояния объекта. Тестовая модель ИК состояла из девяти измерительных систем трех типов с разным набором формируемых данных о векторе состояния объекта. Влияние внешних воздействий на работу ИК описывалось с применением измерительных шумов. Данные от каждой ИС комплексировались с использованием федеративного фильтра Калмана. При обработке данных федеративным фильтром Калмана осуществлялся селективный выбор наиболее достоверного источника информации в соответствии с используемым критерием. Были предложены два критерия выбора: по следу ковариационной матрицы ошибок оценивания и по дисперсии оценок каждой ИС в отдельности по каждому элементу вектора состояния.

Для иллюстрации работы рассмотренных критериев были проведены вычислительные эксперименты по моделированию работы ИК как при наличии измерительных шумов, так и без них. Было установлено, что применение рассмотренных критериев в каждом эксперименте в большинстве случаев обеспечивает меньшую ошибку при оценке вектора состояния объекта — летательного аппарата, чем измерения каждой ИС в отдельности, что свидетельствует о принципиальной применимости рассмотренных критериев. Однако использование критерия по следу ковариационной матрицы приводит к потере части измерений в случае, если выбирается ИС, которая не предоставляет измерение какого-либо параметра объекта, поэтому предпочтительнее выбирать критерий по дисперсии отдельных измерений каждой ИС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hall D.L., Llinas J. An introduction to multisensory data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 1997, vol. 85, no. 1, pp. 6–23.
- [2] Жегалов С.Н., Масленников А.Л. Применение метода DBSCAN для кластеризации отметок координат динамических объектов, формируемых несколькими источниками информации. *Авиакосмическое приборостроение*, 2025, № 2, с. 31–39. DOI: 10.25791/aviakosmos.2.2025.1461
- [3] Barreto-Cubero A.J., Gómez-Espinosa A., Escobedo Cabello J.A., Cuan-Urquizo E., Cruz-Ramírez S.R. Sensor data fusion for a mobile robot using neural networks. *Sensors*, 2022, vol. 22, iss. 1, 305. <https://doi.org/10.3390/s22010305>
- [4] Crisan D., Doucet A. A survey of convergence results on particle filtering methods for practitioners. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, vol. 50, no. 3, pp. 736–746.
- [5] Welch G., Bishop G. An introduction to the Kalman filter. *In Pract.*, 2006, vol. 7, no. 1, pp. 1–16.
- [6] Stover J., Hall D., Gibson R. A fuzzy-logic architecture for autonomous multisensor data fusion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, vol. 43, no. 3, pp. 403–410.
- [7] Cui-Xia L., Wei-Ming L., Zi-Nan F. GPS/ TDOA Hybrid Location Algorithm Based on Federal Kalman Filter. *J. of Convergence Information Technology*, 2010, vol. 5, no. 7, pp. 42–48.
- [8] Даниленко Н.В., Масленников А.Л., Долгова Ю.С. Селективный механизм решения задачи ориентации с реализацией на одноплатном компьютере Raspberry Pi. *Авиакосмическое приборостроение*, 2025, № 1, с. 32–43. DOI: 10.25791/aviakosmos.1.2025.1455
- [9] Безмен П.А. Комплексование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана. *Известия Юго-Западного государственного университета*, 2019, т. 23, № 2, с. 53–64. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64
- [10] Sorenson H.W. Least-Squares estimation: from Gauss to Kalman. *IEEE Spectrum*, July 1970, vol. 7, pp. 63–68.
- [11] Цыганкова И.С., Масленников А.Л. Комплексование навигационной информации ГНСС по нескольким информационным источникам. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020, вып. 19, с. 66–70. DOI: 10.26160/2474-5901-2020-19-66-70

- [12] Завьялов Р.А., Масленников А.Л. О методах прогноза траектории движения подвижного объекта в схеме комплексирования навигационной информации от ГНСС. *Материалы 8-й научно-практической конференции памяти О.В. Успенского: сборник докладов*. В.А. Сорокин, ред. Москва, Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2022, с. 132–136.

Статья поступила в редакцию 14.04.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Радюкин А.Ю., Масленников А.Л. Критерии селективного выбора наиболее достоверного источника информации в измерительных комплексах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 5. EDN JQVLVZ

Радюкин Александр Юрьевич — студент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: radyukinayu@student.bmstu.ru

Масленников Андрей Леонидович — старший преподаватель кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: amas@bmstu.ru

Criteria for selective choice of the most reliable information source in measurement systems

©A.Yu. Radyukin, A.L. Maslennikov

Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

The paper considers criteria for a selective option in identifying the most reliable information source on the aircraft state as a part of the measurement system. It applies to a test mathematical model of the measurement system consisting of three types of the measurement subsystems, which form a different set of the estimated elements of the aircraft state vector based on various physical principles of operation. The federal Kalman filter fuses information on the object state. Norms of the covariance matrices of error estimate formed by the local Kalman filters, as well as measurement variances of each element of the object state vector estimated separately by all the measurement subsystems, are considered as the criteria for selecting the most reliable source of information on the aircraft state. Simulation results show fundamental applicability of each of the considered criteria for selection of the most reliable source of information.

Keywords: fusion criteria, federal Kalman filter, Kalman filter, measurement complexes, measurement systems, information fusion

REFERENCES

- [1] Hall D.L., Llinas J. An introduction to multisensory data fusion. *Proceedings of the IEEE* 85, 1997, no. 1, pp. 6–23.
- [2] Zhegalov S.N., Maslennikov A.L. Primenenie metodov DBSCAN dlya klasterizatsii otmetok koordinat dinamicheskikh obyektov, formiruemykh neskolkimi istochnikami informatsii [Application of the DBSCAN method for clustering coordinate marks of dynamic objects formed by several information sources]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie — Aerospace Instrument-Making*, 2025, no. 2, pp. 31–39. <https://doi.org/10.25791/aviakosmos.2.2025.1461>
- [3] Barreto-Cubero A.J., Gómez-Espinosa A., Escobedo Cabello J.A., Cuan-Urquizo E., Cruz-Ramírez S.R. Sensor data fusion for a mobile robot using neural networks. *Sensors*, 2022, vol. 22, iss. 1, 305. <https://doi.org/10.3390/s22010305>
- [4] Crisan D., Doucet A. A survey of convergence results on particle filtering methods for practitioners. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, vol. 50, no. 3, pp. 736–746.
- [5] Welch G., Bishop G. An introduction to the Kalman filter. *In Pract.*, 2006, vol. 7, no. 1, pp. 1–16.
- [6] Stover J., Hall D., Gibson R. A fuzzy-logic architecture for autonomous multisensor data fusion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, vol. 43, no. 3, pp. 403–410.
- [7] Cui-Xia L., Wei-Ming L., Zi-Nan F. GPS/TDOA hybrid location algorithm based on federal Kalman filter. *J. of Convergence Information Technology*, 2010, vol. 5, no. 7, pp. 42–48.
- [8] Danilenko N.V., Maslennikov A.L., Dolgova Yu.S. Selektivnyi mekhanizm resheniya zadachi orientatsii s realizatsiyey na odnoplattnom kompyutere Raspberry Pi [Selective mechanism for solving the orientation problem with implementation on Raspberry Pi on-board computers]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie — Aerospace Instrument-Making*, 2025, no. 1, pp. 32–43. <https://doi.org/10.25791/aviakosmos.1.2025.1455>

- [9] Bezmen P. A. Kompleksirovanie dannykh sistemy upravleniya mobilnym robotom s ispolzovaniem rasshirenogo filtra Kalmana [Integration of mobile robot control system data using the extended Kalman filter]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta — Proceedings of the Southwest State University*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 53–64.
<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64>
- [10] Sorenson H.W. Least-squares estimation: from Gauss to Kalman. *IEEE Spectrum*, July 1970, vol. 7, pp. 63–68.
- [11] Tsygankova I.S., Maslennikov A.L. Kompleksirovanie navigatsionnoy informatsii GNSS po neskolkim informatsionnym istochnikami [Fusion of GNSS data from different information sources]. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020, iss. 19, pp. 66–70.
<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-19-66-70>
- [12] Zavyalov R.A., Maslennikov A.L. O metodakh prognoza traektorii dvizheniya podvizhnogo obyekta v skheme kompleksirovaniya navigatsionnoy informatsii ot GNSS [On methods for predicting the trajectory of a moving object in the scheme of integrating navigation information from the GNSS]. In: *Materialy 8-y nauchno-prakticheskoy konferentsii pamyati O.V. Uspenskogo: sbornik dokladov* [Proceedings of the 8th scientific and practical conference in memory of O.V. Uspensky: collection of reports]. V.A. Sorokin, ed. Izdatelskiy Dom Akademii imeni N.E. Zhukovskogo, 2022, pp. 132–136.

Radyukin A.Yu., Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: radyukinayu@student.bmstu.ru

Maslennikov A.L., Senior Lecturer, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: amas@bmstu.ru