

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ САМООРГАНИЗАЦИИ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**Тань Вэй**

tanwei701@gmail.com

SPIN-код: 9096-0204

Бай Фань

baifan19960208@gmail.com

SPIN-код: 7163-8491

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Инерциальные навигационные системы (ИНС) с коррекцией от спутников являются наиболее точными. Однако иногда воспользоваться корректирующим сигналом со спутников не представляется возможным, поэтому нужно построить прогнозирующую модель для компенсации погрешности. Метод самоорганизации позволяет построить прогнозирующую модель погрешностей ИНС. В статье проанализирован краткосрочный и долгосрочный прогноз, предложены типичные модели. Применение алгоритма построения модели для прогноза позволяет проверить работоспособность алгоритма формирования математической модели погрешностей ИНС на основе метода самоорганизации. Алгоритмическая коррекция автономной ИНС (когда автономному режиму работы ИНС предшествовал корректируемый режим) с помощью алгоритма построения прогнозирующей модели, а также алгоритмов самоорганизации и прогноза с помощью модели погрешностей ИНС позволяет повысить точность навигационных определений БЛА.

Ключевые слова

Навигация, самоорганизация, краткосрочный прогноз, долгосрочный прогноз, фильтр Калмана, компенсация погрешности, математическая модель, линейные тренды

Поступила в редакцию 14.05.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Управление беспилотными летательными аппаратами (БЛА) осуществляется на основе информации от различных измерительных систем. Измерительные системы объединяются в измерительные комплексы, и, как правило, состоят из инерциальных навигационных систем (ИНС), спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС, различных радиолокационных систем и др. [1–4].

Навигационные системы с коррекцией от спутников являются наиболее точными. Однако бывают ситуации, когда воспользоваться корректирующим сигналом со спутников не представляется возможным. В подобных случаях применяют различные навигационные системы и их сочетания, а также алгоритмический метод повышения точности навигационной информации при функционировании систем в условиях активных и пассивных помех, а также при энергичном маневрировании БЛА [5, 6].

При работе ИНС в автономном режиме погрешности могут достигать неприемлемых значений, поэтому использовать такие системы не представляется возможным. Компенсацию погрешностей измерительных систем в автономном режиме можно осуществлять с помощью алгоритмов прогноза. Погрешности прогнозируются в автономном режиме, а затем компенсируются в выходной информации или в структуре системы [7].

Метод самоорганизации позволяет построить прогнозирующую модель погрешностей ИНС. Сначала модель строится на интервале корректируемой работы ИНС, а затем на интервале автономной работы ИНС с помощью этой модели осуществляется прогноз погрешностей ИНС и коррекция выходной информации системы. После восстановления измерительного сигнала GPS коррекция ИНС вновь осуществляется с помощью фильтра Калмана.

Построение модели для краткосрочного прогноза. Предложен компактный алгоритм прогноза для системы управления БЛА в условиях отсутствия навигационной информации от внешних источников. Алгоритм прогноза является модификацией линейного тренда, полученной посредством подхода самоорганизации.

Управление БЛА осуществляется на основе информации о динамических параметрах и состоянии внешней среды. Информация о параметрах БЛА поступает от различных навигационных систем и систем ориентации. В практических приложениях возникают ситуации, когда измерительные сигналы от навигационных систем временно пропадают, что обусловлено влиянием активных и пассивных помех. В этом случае продолжает функционировать только ИНС. Погрешности сигналов ИНС нарастают с течением времени, поэтому ИНС современных БЛА корректируют с помощью сигналов от других измерительных систем. В ситуации когда другие сигналы временно отсутствуют, необходимо осуществлять коррекцию автономной ИНС посредством прогнозируемых сигналов. Поэтому исследована задача построения алгоритма прогноза, которая всегда является актуальной, так как позволяет повысить точность навигационной информации, а следовательно, и точность функционирования БЛА.

Исследуем ИНС, работающую как в режиме, корректируемом от другой измерительной системы, так и в автономном режиме. ИНС имеют погрешности, которые при движении БЛА в крейсерском режиме могут быть описаны уравнениями следующего вида:

$$X_k = \varphi X_{k-1} + W_{k-1},$$

где X_k — вектор состояния, включающий погрешности измерительной системы; φ — матрица системы; W_{k-1} — входное возмущение, которое предполагается дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием.

Часть вектора состояния определим как

$$Z_k = HX_k + V_k.$$

Здесь Z_k — вектор измерений; V_k — вектор погрешностей измерения; H — матрица измерений.

Погрешности измерений также будем считать дискретным аналогом белого гауссового шума, для которого $M[V_k] = 0$. Погрешности измерения и входные возмущения некоррелированы: $M[V_k; W_k^T] = 0$ при любых j и k .

Вектор состояния в начальный момент времени полагаем случайным гауссовым вектором с нулевым математическим ожиданием, не зависящим от входных возмущений и погрешностей измерений: $M[x_0 V_k^T] = 0$; $M[x_0 W_{k-1}^T] = 0$ для любого k .

В корректируемом режиме осуществляется комплексирование измерительных систем. В качестве внешней измерительной системы используется либо высокоточная система, например GPS/ГЛОНАСС, радиосистема ближней или дальней навигации либо измерительная система, функционирование которой основано на другом физическом принципе действия, нежели базовая корректируемая система.

Как правило, обработка информации от измерительных систем осуществляется с помощью различных алгоритмов оценивания. Модель погрешностей базовой измерительной системы и модель измерений описываются линейными уравнениями, поэтому в качестве алгоритма оценивания может быть использован, например, линейный фильтр Калмана [8]. С помощью фильтра Калмана или его прямых модификаций [9–11] можно оценить вектор состояния системы оптимальным образом. Полученные оценки используют для компенсации погрешностей ИНС в выходном сигнале.

Для прогнозирования погрешностей ИНС необходимо иметь математическую модель. В качестве такой модели может быть выбрана априорная модель погрешностей ИНС. Если априорная модель погрешностей достаточно точно отражает процесс изменения погрешностей, то можно использовать ее для краткосрочного прогноза. При изменениях режима работы измерительной системы или при интенсивном маневрировании БЛА существенно меняется характер погрешностей. В этом случае необходимо идентифицировать отдельные коэффициенты модели, а часто и всю ее структуру. Известные методы идентификации [12, 13], позволяющие идентифицировать структуру и параметры модели, достаточно сложны в реализации на борту БЛА и требуют значительных временных затрат для получения прогнозирующей модели.

Целесообразно использовать наиболее простой в реализации и компактный алгоритм построения прогнозирующей модели, а именно алгоритм с использованием линейных трендов. Линейные тренды отличаются простотой и позволяют определить тенденцию изменения исследуемого процесса. Линейные тренды дают возможность проследить тенденцию изменения погрешностей измерительной системы. Такие тренды можно использовать для прогноза погрешностей на очень коротких интервалах. Увеличить интервал прогноза мож-

но путем использования измерительных выборок разной величины, что позволяет повысить точность интерполяционного тренда, но прогнозирующий тренд при этом не обязательно будет более точным (эффект старения измерений).

Разработанный алгоритм является модификацией линейных трендов с помощью подхода самоорганизации. Подход самоорганизации позволяет минимизировать априорную информацию об объекте исследования, а также усложнять модели без учета ряда существенных факторов. В основе подхода самоорганизации лежит допущение о том, что вся информация о системе содержится в измерительной выборке и критериях селекции модели.

При самоорганизации прогнозирующих моделей применяют случайный генератор моделей-претендентов. С помощью ансамбля критериев проводят селекцию математических моделей. В дальнейшем происходит постепенное усложнение модели с оценкой ее посредством ансамбля критериев селекции.

Структура модифицированных линейных трендов имеет следующий вид:

$$x_k = x_{k-1} + c_{k-1},$$

где x_k — переменная состояния динамического объекта, в конкретном случае погрешность базовой измерительной системы судна; c_{k-1} — коэффициент или функция, характеризующая крутизну тренда.

С помощью коэффициента крутизны тренда определяется тенденция происходящих изменений переменной состояния динамического объекта. Использование функции вместо коэффициента позволяет уточнить характер происходящих изменений. Функцию выбирают из стандартного набора элементарных базисных функций классического алгоритма самоорганизации.

Для селекции модифицированных трендов используют общие критерии, например критерий вида

$$\Delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (z_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^N z_i^2}, \quad (4)$$

где z_i — измерения проверочной выборки; \hat{x}_i — значение модели, $i = \overline{1, N}$; z_i^2 — среднеквадратическая погрешность, вычисленная на проверочной выборке N .

Таким образом, разработан простой алгоритм прогноза являющийся модификацией линейного тренда с помощью подхода самоорганизации. Тренды усложняются, а затем подвергаются селекции с помощью ансамбля критериев. В качестве измерительной и проверочной выборок, на которых строится тренд, используются оценки исследуемого параметра, полученные на интервале интерполяции, либо сглаженные измерительные сигналы. Применение разработанного алгоритма построения прогнозирующей модели для коррекции ИНС в автономном режиме позволяет повысить точность системы управления БЛА и обеспечить выполнение поставленных задач.

Алгоритм построения модели для долгосрочного прогноза. Различные подходы к прогнозу различаются по объему необходимой для прогноза априорной информации об исследуемом объекте.

Рассмотрим автономную ИНС, функционирующую длительный период времени (более 6 ч). Проводить коррекцию ИНС от внешних по отношению к ней приборов и систем не представляется возможным.

Ставится задача компенсации погрешностей автономных ИНС с использованием только внутренней информации. Предполагается также, что автономному режиму работы ИНС предшествовал период работы системы в режиме коррекции от спутниковой системы. Структурная схема навигационного комплекса с использованием алгоритма построения модели (АПМ) при отключении внешних датчиков представлена на рис. 1.

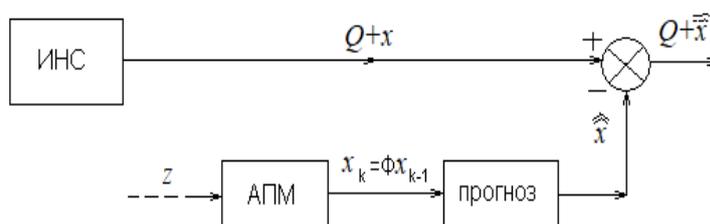


Рис. 1. Структурная схема НК с использованием АПМ при отключении внешних датчиков

Для эффективного выполнения поставленных задач динамические объекты обычно имеют возможность перемещаться в пространстве по различным траекториям. При проектировании систем управления динамическими объектами, функционирующими в активно противодействующей среде, как правило, предусматривается не только возможность совершения различных маневров, но и управление на основе прогноза состояния объекта.

В практических приложениях прогнозирование состояния маневрирующего объекта с использованием априорных математических моделей не представляется возможным.

При функционировании динамического объекта в стохастических условиях объем априорной информации о нем, как правило, минимален, поэтому целесообразно использовать для экстраполяции подход самоорганизации.

Самоорганизация позволяет построить математическую модель без априорного указания закономерностей исследуемого объекта. Разработчик математической модели должен задать ансамбль критериев селекции (критериев самоорганизации) выбора модели, а математическая модель оптимальной сложности выбирается уже автоматически.

Реализация алгоритма самоорганизации предполагается на борту динамического объекта. Обычно к таким алгоритмам предъявляют достаточно жесткие требования по быстродействию, компактности и простоте реализации в бортовой цифровой вычислительной машине. Особенно большое значение эти тре-

бования имеют при прогнозировании состояния высокоманевренных динамических объектов.

Результаты математического моделирования. Цель исследований — проверить работоспособность алгоритма формирования математической модели погрешностей ИНС на основе метода самоорганизации.

Реальная математическая модель погрешности ИНС имеет вид

$$x_k = \Phi x_{k-1} + W_{k-1};$$

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}, \quad W_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W_k \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1-\beta T \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где T — период дискретизации; W_{k-1} — дискретный аналог белого шума; β — средняя частота случайного изменения дрейфа.

Коэффициенты реальной модели для алгоритма скрыты. Известными параметрами являются входной и выходной сигналы с «черного ящика» навигационной системы.

Для демонстрации работы алгоритма использованы следующие параметры матрицы Φ : $g = 9,8$; $T = 1$; $R = 6\,370\,000$.

Покажем, что алгоритм самоорганизации работает при различных коэффициентах реальной системы. Для этого в каждом случае будем использовать различные значения коэффициента β : $\beta_1 = 10^{-3}$; $\beta_2 = 2 \cdot 10^{-3}$; $\beta_3 = 4 \cdot 10^{-3}$. Шумы в модели системы не учитываются.

Результаты работы алгоритма в графической форме показаны на рис. 2–3. Здесь значению $\beta_1 = 10^{-3}$ соответствует синий график; значению $\beta_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ — красный, средний на всех рисунках; $\beta_3 = 4 \cdot 10^{-3}$ — зеленый.

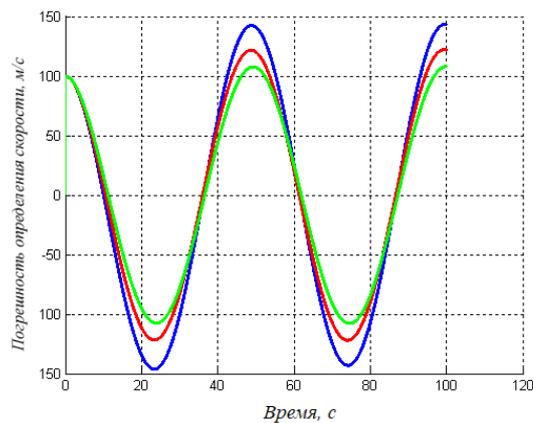
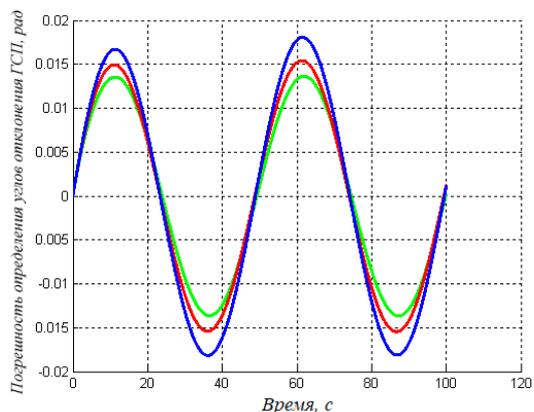


Рис. 2. Результаты моделирования процесса прогнозирования погрешностей определения скорости

Рис. 3. Результаты моделирования процесса прогнозирования погрешностей по углам отклонения ГСП



На рис. 4–5 красный график соответствует модели, полученной с помощью алгоритма самоорганизации, синий — реальной модели погрешностей ИНС.

Рис. 4. Результаты моделирования погрешностей в определении скорости при помощи алгоритма саморганализации

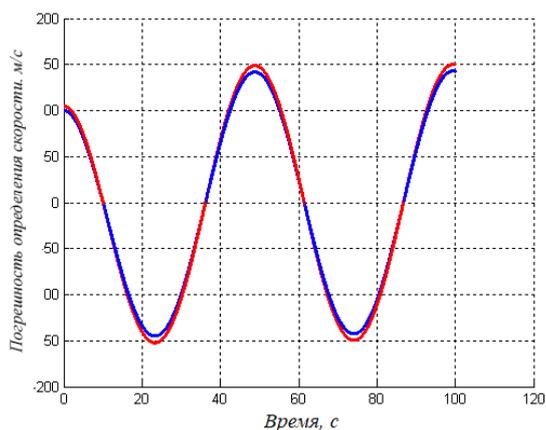
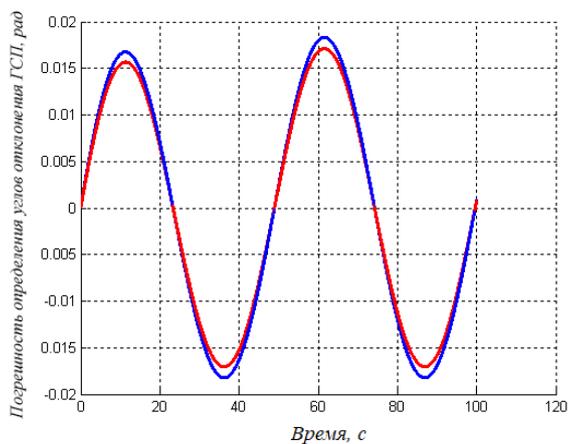


Рис. 5. Результаты моделирования погрешностей определения углов отклонения ГСП с помощью алгоритма самоорганизации



Результаты моделирования продемонстрировали работоспособность исследованного алгоритма самоорганизации для коррекции автономной ИНС. Погрешность формирования модели по данным математического моделирования в среднем не превышает 5 % номинала.

Использование математической самоорганизованной модели для долгосрочного прогнозирования представлено на рис. 11. Погрешность прогнозирования по данным математического моделирования не превышает 20 %.

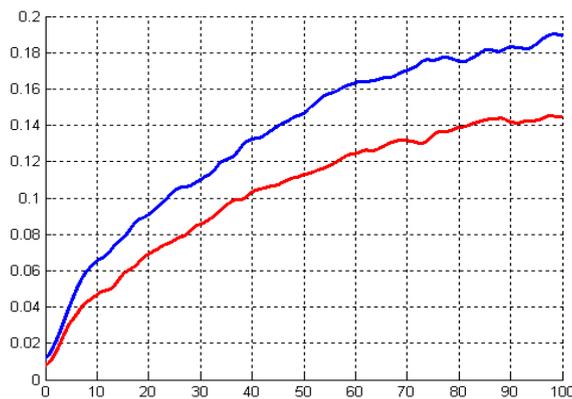


Рис.11. Результаты моделирования процесса прогнозирования:

синий — реальная модель; красный — результат прогнозирования с помощью самоорганизованной модели

Таким образом, с помощью математического моделирования продемонстрирована работоспособность алгоритма самоорганизации и возможность его использования для построения прогнозирующей модели погрешностей ИНС.

Заключение. При движении БЛА на атмосферном участке для построения прогнозирующей математической модели погрешностей базовой системы навигационного комплекса БЛА разработан алгоритм самоорганизации.

Для краткосрочной коррекции ИНС при исчезновении сигнала ГЛОНАСС используется простая прогнозирующая модель, представляющая собой линейный тренд, который с течением времени усложняется с помощью алгоритма самоорганизации.

Для долгосрочной коррекции ИНС в автономном режиме функционирования использован классический алгоритм самоорганизации. Результаты математического моделирования продемонстрировали работоспособность и высокую точность использованных алгоритмов.

Алгоритмическая коррекция автономной ИНС (когда автономному режиму работы ИНС предшествовал корректируемый режим) с помощью алгоритма построения прогнозирующей модели алгоритмом самоорганизации и прогноза с помощью этой модели погрешностей ИНС позволяет повысить точность навигационных определений БЛА. Точность коррекции зависит от характера изменения погрешностей ИНС.

В практических приложениях при использовании алгоритмов для коррекции реальных ИНС БЛА точность компенсации будет, скорее всего, несколько

ниже, чем при математическом моделировании, что обусловлено более сложным характером процесса изменения погрешностей ИНС.

Литература

- [1] Селезнева М.С. Разработка алгоритмов комплексирования навигационных систем летательных аппаратов. Дисс. ... канд. тех. наук. М., МГУТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [2] Селезнева М.С., Оглоблина Ю.С. Построение самоорганизующейся модели с высокой степенью наблюдаемости. *Научный взгляд. Тр. межд. науч.-практ. конф.* М., МГОУ, 2015, с. 250–253.
- [3] Astrom K.J., McAvoy T.J. Intelligent control: an overview and evaluation. Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [4] Шашурин В.Д., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Технология формирования акцептора действия навигационного комплекса с использованием динамического системного синтеза. *Автоматизация. Современные технологии*, 2018, т. 72, № 3, с. 121–126.
- [5] Shen K., Selezneva M.S., Neusyypin K.A., et al. A novel variable structure measurement system with intelligent components for flight vehicles. *Metrol. Meas. Syst.*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 347–356.
- [6] Noureldin A., Karamat T.B., Georgy J. Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration. Springer, 2013.
- [7] Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата. *Современные аспекты фундаментальных наук. Тр. 2-го межд. симп.* М., МГОУ, 2015, с. 196–199.
- [8] Kalman R.E., Ho Y.C., Narendra K.S. Controllability of linear dynamical systems. *Contributions to the Theory of Differential Equations*, 1963, vol. 1, no. 2, pp. 189–213.
- [9] Shakhhtarin B.I., Shen K., Neusyypin K.A. Modification of the nonlinear Kalman filter in a correction scheme of aircraft navigation systems. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2016, vol. 61, no. 11, pp. 1252–1258. DOI: 10.1134/S1064226916110115 URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1064226916110115>
- [10] Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. и др. Использование федерального фильтра Калмана для коррекции навигационных систем летательных аппаратов. *Автоматизация. Современные технологии*, 2018, т. 72, № 9, с. 428–432.
- [11] Пролетарский А.В., Чжан Л., Селезнева М.С. и др. Способы использования критерия степени наблюдаемости переменных состояния в федеративном фильтре Калмана. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, 2018, № 8, с. 9–18.
- [12] Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Пролетарский А.В. и др. Алгоритм построения модели ИНС/ГНСС интегрированной навигационной системы с использованием критерия степени идентифицируемости. *Юбилейная XXV Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам.* СПб., Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2018, с. 30–34.
- [13] Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Кай Ш. и др. Разработка численного критерия степени идентифицируемости параметров нелинейной модели атмосферных летательных аппаратов. *Автоматизация. Современные технологии*, 2018, т. 72, № 5, с. 223–227.

Тань Вэй — студент кафедры «Технологии приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Бай Фань — студент кафедры «Технологии приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Селезнева Мария Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Тань Вэй, Бай Фань. Разработка алгоритмов самоорганизации навигационной системы беспилотного. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 10(39). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-532>

DEVELOPMENT OF SELF-ORGANIZING ALGORITHMS FOR THE NAVIGATION SYSTEM OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Tan Wei

tanwei701@gmail.com

SPIN-code: 9096-0204

Bai Fan

baifan19960208@gmail.com

SPIN-code: 7163-8491

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Inertial navigation systems (INS) with satellite corrections are the most accurate. However, sometimes it is not possible to use the correction signal from satellites, therefore, it is necessary to build a predictive model to compensate the error. The self-organization method allows one to build a predictive model of INS errors. The article analyzes the short-term and long-term forecast, typical models are proposed. The use of the model building algorithm for forecasting allows one to check the operability of the algorithm for generating the mathematical model of INS errors based on the self-organization method. Algorithmic correction of an autonomous INS (when an autonomous INS operation was preceded by a corrected mode) using an algorithm for constructing a predictive model, as well as self-organization and forecast algorithms using an INS error model, can improve the accuracy of UAV navigation definitions.

Keywords

Navigation, self-organization, short-term forecast, long-term forecast, Kalman filter, error compensation, mathematical model, linear trends

Received 14.05.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Selezneva M.S. Razrabotka algoritmov kompleksirovaniya navigatsionnykh sistem letatel'nykh apparatov. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of algorithms for integration of aircraft navigation systems. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017 (in Russ.).
- [2] Selezneva M.S., Ogloblina Yu.S. [Developing self-organizing model with high self-organizing degree]. *Nauchnyy vzglyad. Tr. mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Scientific view. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Moscow, MGOU Publ., 2015, pp. 250–253 (in Russ.).
- [3] Astrom K.J., McAvoy T.J. Intelligent control: an overview and evaluation. Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [4] Shashurin V.D., Selezneva M.S., Neusypin K.A. The formation technology of the navigation complex action acceptor through the use of dynamic system synthesis. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2018, vol. 72, no. 3, pp. 121–126 (in Russ.).
- [5] Shen K., Selezneva M.S., Neusypin K.A., et al. A novel variable structure measurement system with intelligent components for flight vehicles. *Metrol. Meas. Syst.*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 347–356.
- [6] Noureldin A., Karamat T.B., Georgy J. Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration. Springer, 2013.

- [7] Proletarskiy A.V., Selezneva M.S. [Aircraft measurement system with intelligent component]. *Sovremennyye aspekty fundamental'nykh nauk. Tr. 2-go mezhd. simp.* [Modern aspects of fundamental sciences. Proc. 2nd Int. Symp.]. Moscow, MGOU Publ., 2015, pp. 196–199 (in Russ.).
- [8] Kalman R.E., Ho Y.C., Narendra K.S. Controllability of linear dynamical systems. *Contributions to the Theory of Differential Equations*, 1963, vol. 1, no. 2, pp. 189–213.
- [9] Shakhtarin B.I., Shen K., Neusyypin K.A. Modification of the nonlinear Kalman filter in a correction scheme of aircraft navigation systems. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2016, vol. 61, no. 11, pp. 1252–1258. DOI: 10.1134/S1064226916110115 URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1064226916110115>
- [10] Klychnikov V.V., Selezneva M.S., Neusyypin K.A., et al. Using the federal Kalman filter to correct aircraft navigation systems. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii*, 2018, vol. 72, no. 9, pp. 428–432 (in Russ.).
- [11] Proletarskiy A.V., Chzhhan L., Selezneva M.S., et al. Methods of the state variables criterion of the degree of observability using of in the federative Kalman filter. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2018, no. 8, pp. 9–18 (in Russ.).
- [12] Neusyypin K.A., Selezneva M.S., Proletarskiy A.V., et al. [INS/GNSS modeling algorithm for integrated navigation system using identifiability degree criteria]. *Yubileynaya XXV Sankt-Peterburgskaya Mezhd. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam* [Anniversary XXV Sankt-Petersburg Int. Conf. on integrated navigation systems]. Sankt-Petersburg, Kontsern TsNII "Elektropribor" Publ., 2018, pp. 30–34 (in Russ.).
- [13] Neusyypin K.A., Selezneva M.S., Kay Sh., et al. Development of a numerical criterion of the parameters identifiability degree for a nonlinear model of atmospheric aircraft. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii*, 2018, vol. 72, no. 5, pp. 223–227 (in Russ.).

Tan Wei — Student, Department of Instrument Production Techniques, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Bai Fan — Student, Department of Instrument Production Techniques, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Selezneva M.S., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Instrument Production Techniques, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Tan Wei, Bai Fan Development of self-organizing algorithms for the navigation system of an unmanned aerial vehicle. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 10(39). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-532.html> (in Russ.).