

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ САМООРГАНИЗАЦИИ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Чжао Ян

AirYangTeddy@foxmail.com

SPIN-код: 6592-7854

Шэнь Синь

shenxin@yandex.ru

SPIN-код: 2583-874

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

Аннотация

Управление летательными аппаратами осуществляется на основе информации, получаемой от навигационных систем. Навигационные системы имеют разнообразные погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования. Исследованы особенности всех трех разных схем коррекции инерциальной навигационной системы (ИНС) с помощью алгоритма математического моделирования. Метод самоорганизации позволяет построить прогнозирующую модель погрешностей ИНС. Строится модель на интервале корректируемой работы ИНС. На интервале автономной работы ИНС с помощью этой модели осуществляется прогноз погрешностей ИНС и коррекция в выходной информации системы. После восстановления измерительного сигнала GPS коррекция ИНС вновь осуществляется с помощью фильтра Кальмана.

Ключевые слова

Летательный аппарат, инерциальная навигационная система, алгоритм самоорганизации, погрешности навигационных систем, схема коррекции, система, математическое моделирование, фильтр Калмана

Поступила в редакцию 16.04.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. На основе информации от различных измерительных систем осуществляется управление беспилотными летательными аппаратами (БЛА). Навигационные системы с коррекцией от спутников являются наиболее точными. Нередко бывает так, что 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 [1–3].

Для осуществления прогноза необходимо иметь модель погрешностей исследуемой измерительной системы. В качестве такой модели может быть использована априорная модель погрешностей измерительной системы. Эта модель получена на основе априорной информации и не корректируется в процессе функционирования конкретной измерительной системы [4–6].

Метод самоорганизации позволяет построить прогнозирующую модель погрешностей ИНС. Эта модель строится на интервале корректируемой работы ИНС. На интервале автономной работы ИНС с помощью этой модели осуществляются прогноз погрешностей ИНС и коррекция в выходной информации системы. После восстановления измерительного сигнала GPS коррекция ИНС вновь осуществляется с помощью фильтра Кальмана [7–9].

Задачей настоящей работы является исследование алгоритма самоорганизации для коррекции навигационных систем.

Схемы коррекции ИНС. Спутниковые навигационные системы (СНС) обладают достаточно высокой долговременной точностью, однако чувствительна к пассивным и активным помехам. Поэтому при использовании СНС в качестве внешнего источника информации необходимо учитывать эти особенности.

Пассивные помехи обусловлены целым рядом факторов: тропосферными, ионосферными, погодными явлениями (отражением радиосигналов от дождевых фронтов и др.), эффектами отраженных сигналов (в частности, при использовании в районах высотной городской застройки). При движении наземных объектов под кронами деревьев появляются мерцающие помехи, обусловленные листвой, и т. п.

Активные помехи устанавливаются противником и действуют чрезвычайно эффективно: простейшее устройство GPS-jamming позволяет зашумить частоту спутниковых сигналов с помощью генератора случайных помех. Более сложные способы предполагают настройку на частоту сигнала спутника с последующими манипуляциями с его информационной составляющей.

В условиях действия активных и пассивных помех сигналы СНС становятся недоступными и реализовать схему коррекции, представленную на рис. 1, не представляется возможным до тех пор, пока не произойдет восстановление сигнала.

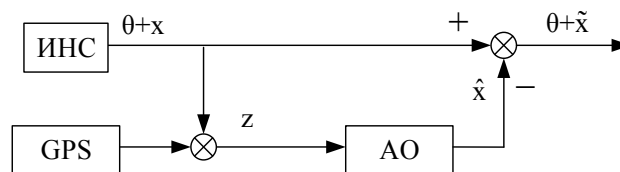


Рис. 1. Схема коррекции ИНС по показаниям СНС:

- АО — алгоритм оценивания; θ — истинная навигационная информация;
 — — сигнал с датчика угла прецессии; x — вектор погрешностей ИНС;
 \hat{x} — оценки погрешностей ИНС; \tilde{x} — погрешности оценивания

Компенсация погрешностей ИНС предполагает формирование сигналов коррекции, пропорциональных погрешностям системы в определении скорости, углам отклонения гиросtabilизированной платформы (ГСП) относительно сопровождающего трехгранника и дрейфам ГСП. Эти погрешности автономной ИНС в отсутствие сигналов СНС не поддаются непосредственному измерению, поэтому в качестве измерений используют углы отклонения ГСП относительно сопровож-

дающего трехгранника, сформированные на основе информации, снимаемой с датчиков углов прецессии гироскопов, или сигналы с акселерометров.

Наиболее точная коррекция современных ИНС осуществляется алгоритмическим путем с использованием информации от СНС. В качестве алгоритмов коррекции часто используются различные алгоритмы оценивания для вычисления погрешностей измерительных систем.

Схема коррекции автономной ИНС представлена на рис. 2.

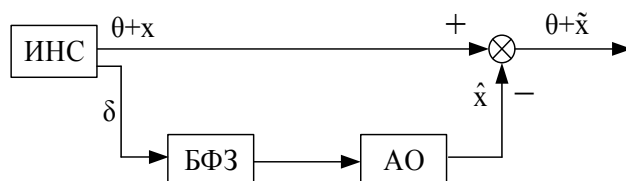


Рис.2. Схема коррекции автономной ИНС:
БФЗ — блок формирования измерений

Если предусмотрена возможность использовать последнюю измерительную выборку (на ограниченном интервале до исчезновения сигналов СНС), то возможно применение схемы коррекции с алгоритмом построения прогнозирующей модели. Учесть все особенности характера изменения погрешностей ИНС можно посредством построения нелинейной модели с помощью одного из эволюционных алгоритмов. В этом случае прогнозируют исчезнувшие сигналы — для коррекции используют последние значения сигналов СНС, априорные модели погрешностей ИНС и др. Схема коррекции ИНС в автономном режиме представлена на рис. 3.

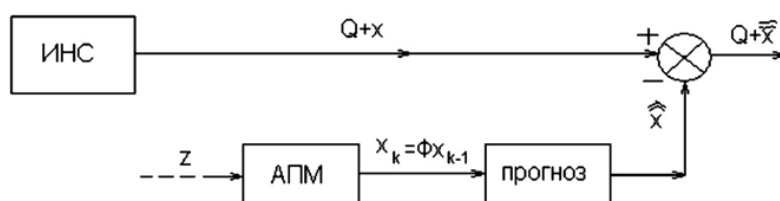


Рис. 3. Схема коррекции ИНС в автономном режиме:

АПМ — алгоритм построения модели; x — прогноз погрешностей ИНС

Приведенные схемы коррекции при отсутствии сигналов СНС существенно уступают в точности ИНС, корректируемой от СНС. Поэтому при восстановлении сигналов СНС используют схему коррекции, представленную на рис. 3. Для восстановления сигналов СНС необходимо время, затрачиваемое на настройку системы. На этом временном интервале измерения в схеме коррекции имеют аномальный характер, использовать их для вычисления оценок погрешностей ИНС нецелесообразно. Поэтому на интервале настройки СНС навигационная информация недоступна до момента появления устойчивых сигналов и коррек-

ция не осуществляется. Временной интервал настройки СНС зависит от многих факторов, в частности от конфигурации наблюдаемого созвездия спутников, характера присутствующих помех и т.д., а также от времени отсутствия информационного контакта со спутниками. [10–12].

Рассмотрим три варианта потери информационного контакта со спутниками (см. таблицу).

Варианты потери информационного контакта

Вариант потери контакта — Режим возобновления функционирования спутникового приемника	Интервал времени от предыдущего момента получения актуальной информации об альманахе и эфемеридах наблюдаемых спутников до текущего момента	Интервал времени настройки показаний СНС после восстановления спутниковых сигналов
Краткосрочная (информация об альманахе и эфемеридах спутников актуальная) — «горячий» старт	до 30 мин	от 1 до 4 с
Среднесрочная (информация об альманахе актуальная, об эфемеридах спутников устарела) — «теплый» старт	от 30 мин до 30 сут	от 30 до 60 с
Долгосрочная (информация об альманахе и эфемеридах спутников устарела) — «холодный» старт	от 30 суток	от 1 до 20 мин

В первом случае после потери информационного сигнала от СНС осуществляется прогнозирование сигнала оценки с помощью априорной модели, которая используется в алгоритме оценивания. Время настройки обычно незначительно.

Во втором и третьем случаях используются схемы коррекции, представленные на рис. 2 и 3, а время восстановления устойчивого сигнала СНС существенно увеличивается.

В первых двух случаях при появлении аномальных сигналов СНС в процессе настройки целесообразно вычислять оценку ошибок ИНС следующим образом.

Алгоритмы самоорганизации. Определим систему (или программу) эвристической самоорганизации как систему, которая имеет многорядную или иерархическую структуру ее алгоритма. В каждом ряду этой системы используются интегральные пороговые самоотборы полезной информации. Чтобы сделать эти самоотборы эффективными, применяют один или несколько генераторов случайных комбинаций. Вследствие этого сложность переменных с каждым рядом увеличивается. Если комбинаций не очень много, выполняют полный их перебор.

Функциональная схема алгоритма самоорганизации представлена на рис. 4.

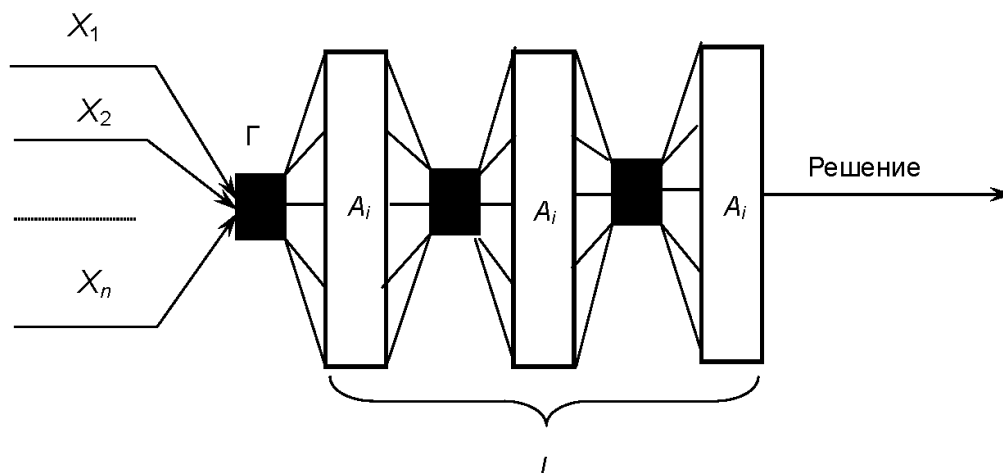


Рис. 4. Функциональная схема алгоритма самоорганизации

A_i — пороговые самоотборы полезной информации; Γ — генератор случайных комбинаций (гипотез); I — критерий самоотбора

Каждой базисной функции поставим в соответствие вектор параметров и исследуем двухмерный вектор $(a, f)^m$, где a — амплитуда, f — частота. Параметризованное множество базисных функций имеет вид

$$F_n = \{a_{ii}(f_i x) | i = 1, \dots, N\}.$$

Алгоритм самоорганизации основан на гипотезе селекции моделей с использованием ансамбля критериев [13, 14]. Получаемая в результате модель имеет вид

$M(x) = \sum_{i=1}^N a_i \mu_{ni}(f_i x)$, где N — число базисных функций в модели; μ_{ni} — базисные функции из F_p .

Работоспособность алгоритма самоорганизации продемонстрирована на примере моделирования погрешностей ИНС. ИНС представляет собой совокупность акселерометров, установленных на гиросtabilизированной платформе (ГСП). Управление ЛА осуществляется на основе информации, получаемой от ИНС. В интеллектуальной системе управления осуществляется прогнозирование навигационной информации на основе измерительных выборок различной длительности. На основе этого прогноза в ИСУ выбирается сценарий полета ЛА.

Результат прогноза погрешностей ИНС представлен на рис. 5.

Среднее квадратичное отклонение погрешностей прогнозирования ГСП с использованием короткой измерительной выборки (20 измерений) равно $1,3 \cdot 10^{-5}$ рад, а алгоритма с измерительной выборкой (50 измерений) — $0,6 \cdot 10^{-5}$ рад. Алгоритм с более богатой измерительной выборкой имеет более высокую точность прогнозирования.

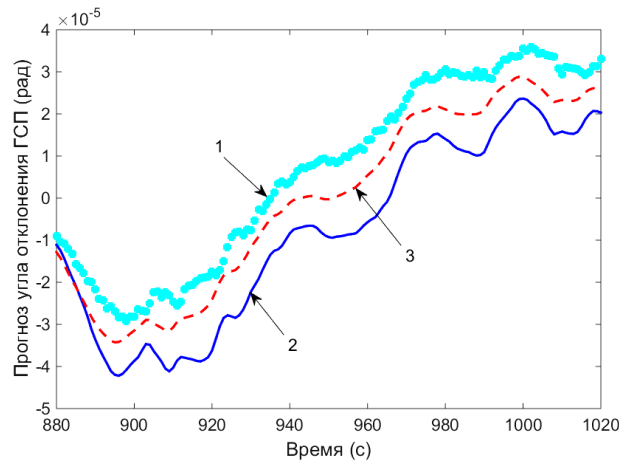


Рис. 5. Прогноз углов отклонения ГСП реальной системы ИНС, полученный с помощью алгоритма самоорганизации

Таким образом, исследован алгоритм самоорганизации, являющийся элементом ИСУ ЛА. Продемонстрирована зависимость точности прогноза в зависимости от длительности используемой измерительной выборки.

Результаты математического моделирования. Для моделирования выбраны тестовая математическая модель погрешностей ИНС и типовая модель погрешностей СНС. Модели погрешностей навигационных систем сформированы с использованием датчиков случайных чисел.

Рассмотрены схемы коррекции ИНС в выходном сигнале с помощью алгоритма оценивания, а также с помощью алгоритма прогноза. Для проверки работоспособности алгоритмов использована математическая модель погрешностей ИНС

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

где

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ T/R & 1 & T \\ 0 & 0 & 1-\beta T \end{bmatrix}; \quad W_{k-1} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix}.$$

Здесь δV_k — ошибки ИНС в определении скорости; φ_k — углы отклонения ГСП от сопровождающего трехгранника, ε_k — скорость дрейфа ГСП; g — ускорение свободного падения; B — смещение нуля акселерометра, $B = 10^{-2}$; R — радиус Земли; T — период дискретизации; β — средняя частота случайного изменения дрейфа; W_{k-1} — дискретный аналог белого гауссового шума.

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.

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

Использование математической самоорганизованной модели для долгосрочного прогнозирования представлено на рис. 6. Погрешность прогнозирования по данным математического моделирования не превышает 20 %.

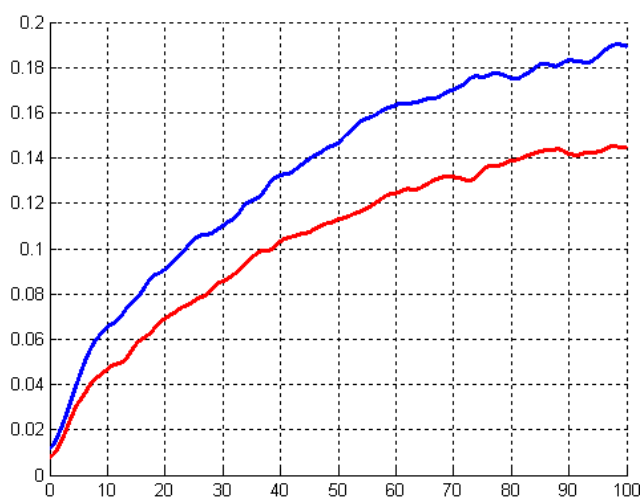


Рис. 6. Результаты моделирования процесса прогнозирования: верхний — реальная модель; нижний — результат прогнозирования с помощью самоорганизованной модели

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 ошибок 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 из-за более сложного характера 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] Shen K., Selezneva M.S., Neusylin K.A. Development of an algorithm for correction of an inertial navigation system in off-line mode. *Meas. Tech.*, 2018, vol. 60, no. 10, pp. 991–997. DOI: 10.1007/s11018-018-1306-8 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11018-018-1306-8>
- [5] Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Неусыпин К.А. и др. Навигационный комплекс с повышенными характеристиками наблюдаемости и управляемости. *Авиакосмическое приборостроение*, 2016, № 6, с. 18–24.
- [6] Grewal S.M., Weil L.R., Andrews A.P. Global positioning systems, inertial navigation, and integration. John Wiley & Sons, 2004.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Collinson R.P.G. Introduction to avionics systems. Springer, 2011.
- [11] Groves P.D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Artech House, 2013.
- [12] Jazwinski A.H. Stochastic processes and filtering theory. Dover Publications, 2007.
- [13] Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Разработка навигационного комплекса с интеллектуальной компонентой. *Будущее машиностроения России. Сб. док. 8й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов*. М., МГУТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 1115–1118.

- [14] Selezneva M.S., Neusyпин K.A. Development of a measurement complex with intelligent component. *Meas. Tech.*, 2016, vol. 59, no. 9, pp. 916–922. DOI: 10.1007/s11018-016-1067-1 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11018-016-1067-1>

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

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

Научный руководитель — Неусыпин Константин Авенирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чжао Ян, Шэнь Синь. Разработка алгоритмов самоорганизации для коррекции навигационных систем. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 10(39). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-538>

DEVELOPMENT OF SELF-ORGANIZATION ALGORITHMS FOR NAVIGATION SYSTEMS CORRECTION

Zhao Yang

AirYangTeddy@foxmail.com

SPIN-code: 6592-7854

A.V. Shlyakhtenkova

shenxin@yandex.ru

SPIN-code: 2583-874

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Aircraft are controlled based on information received from navigation systems. Navigation systems have a variety of errors due to design features and operating conditions. The features of all three different inertial navigation system (INS) correction schemes are studied using the mathematical modeling algorithm. The self-organization method allows one to build a predictive model of INS errors. The model is built on the interval of the corrected INS operation. On the interval of autonomous INS operation, using this model, the INS errors and correction in the system output information are forecasted. After restoration of the GPS measurement signal, the INS correction is performed again using the Kalman filter.

Keywords

Aircraft, inertial navigation system, self-organization algorithm, navigation system errors, correction scheme, mathematical modeling, Kalman filter

Received 16.04.2019

© 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] Shen K., Selezneva M.S., Neusypin K.A. Development of an algorithm for correction of an inertial navigation system in off-line mode. *Meas. Tech.*, 2018, vol. 60, no. 10, pp. 991–997. DOI: 10.1007/s11018-018-1306-8 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11018-018-1306-8>
- [5] Dzhandzhgava G.I., Babichenko A.V., Neusypin K.A., et al. Navigation complex with high degrees of observability and controllability. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2016, no. 6, pp. 18–24 (in Russ.).
- [6] Grewal S.M., Weil L.R., Andrews A.P. Global positioning systems, inertial navigation, and integration. John Wiley & Sons, 2004.
- [7] Klychnikov V.V., Selezneva M.S., Neusypin K.A., et al. Using the federal Kalman filter to correct aircraft navigation systems. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2018, vol. 72, no. 9, pp. 428–432 (in Russ.).

- [8] Proletarskiy A.V., Chzhan 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.).
- [9] 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.
- [10] Collinson R.P.G. Introduction to avionics systems. Springer, 2011.
- [11] Groves P.D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Artech House, 2013.
- [12] Jazwinski A.H. Stochastic processes and filtering theory. Dover Publications, 2007.
- [13] Neusypin K.A., Selezneva M.S. [Development of navigational complex with intellectual component]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii. Sb. dok. 8y Vseros. konf. molodykh uchennykh i spetsialistov* [The future of Russian Mechanical Engineering. Proc. 8th Russ. Conf. of Young Scientists and Specialists]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015, pp. 1115–1118 (in Russ.).
- [14] Selezneva M.S., Neusypin K.A. Development of a measurement complex with intelligent component. *Meas. Tech.*, 2016, vol. 59, no. 9, pp. 916–922. DOI: 10.1007/s11018-016-1067-1 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11018-016-1067-1>

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

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

Scientific advisor — Neusypin K.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Zhao Yang, Shen Xin Development of self-organization algorithms for navigation systems correction. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 10(39). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-538.html> (in Russ.).