

УДК 656.052.16

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А. Е. Куцев, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0008-8736-0944, e-mail: artem28k@yandex.ru

А. Е. Серебряков, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0008-8593-7374, e-mail: sea89s@yandex.ru

В статье рассматривается принцип работы бесплатформенной инерциальной навигационной системы и приводится обзорное описание методов фильтрации и восстановления навигационной информации. Рассмотрены методы повышения точности работы навигационных систем за счет сведения многомерного пространства входных данных к меньшему числу измерений и применения обратных связей в классической модели фильтра Калмана и нейросетей.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, принцип работы, фильтрация, анализ.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-89-31-38

Введение

Наиболее важной задачей беспилотных перемещающихся аппаратов является определение их положения в пространстве. Эта задача решается с помощью навигационной системы, важным требованием к которой является автономность: способность по данным только с инерциальных датчиков определять положение аппарата в трехмерном пространстве.

Различают платформенные и бесплатформенные навигационные системы (БИНС). БИНС являются более развитым устройством, в котором компенсация угловых вращений тела производится математически с помощью цифрового процессора. Сама БИНС жестко установлена в корпус летательного аппарата и вырабатывает сигналы, пропорциональные угловым и линейным перемещениям [1].

Широкое применение БИНС в беспилотных системах получила вследствие быстрого развития микроэлектромеханических систем (МЭМС) и следующих преимуществ: малые размеры и масса инерциальных датчиков, низкое энергопотребление, высокая надёжность, а также низкая рыночная стоимость [2, 3]. Однако точность инерциальных МЭМС датчиков остается относительно невысокой, поэтому такие системы при решении навигационных уравнений быстро накапливают ошибки [4, 5]. Для их компенсации используются различные методы фильтрации, восстановления и организации обратных связей с использованием дополнительных данных, получаемых с других датчиков или внешних систем.

Принцип работы бесплатформенной инерциальной навигационной системы

Принцип работы БИНС заключается в переходе от связанной системы координат к выбранной, путём решения уравнений ориентации. Далее осуществляется решение уравнений навигации для определения собственного положения в пространстве. Таким образом, задачи разбивается на два алгоритма: ориентации и навигации. Наибольшее влияние на результаты решения задачи навигации оказывает алгоритм ориентации [1].

Классическая модель ориентации

В бесплатформенной инерциальной навигационной системе датчики жестко закреплены к подвижному объекту. С помощью триады гироскопов и акселерометров (инерциальный измерительный модуль) измеряется угловая скорость и ускорение по трём осям. Затем с по-

мощью цифрового процессора (вычислителя) осуществляется переход из связанной системы координат в географическую, вычисляются углы ориентации, скорость и текущее положение объекта. Упрощенная схема бесплатформенной инерциальной навигационной системы показана на рисунке 1. Для уточнения результатов решения задачи ориентации чаще всего используют геомагнитную ориентацию [6].



Рисунок 1 – Блок-схема бесплатформенной инерциальной навигационной системы
Figure 1 – Block diagram of strapdown inertial navigation system

Геомагнитная ориентация

Реализация высокоточной геомагнитной ориентации основана на двух частях: алгоритме коррекции ошибок магнитных помех и алгоритме расчета ориентации [6]. На точность геомагнитной ориентации влияют два основных фактора: собственная погрешность и внешние магнитные помехи. Для применения алгоритма расчета с помощью данных с магнитометров требуется наличие модели геомагнитного поля. Основные модели: наклонный диполь (описывает поле диполя, наклоненного под углом около 10-12 градусов к оси вращения Земли и направленного антипараллельно ей), прямой диполь (геомагнитное поле моделируется полем диполя, расположенного в центре Земли и антипараллельного ее оси вращения), осреднённая модель (упрощение модели прямого диполя) [7].

Алгоритм геомагнитной ориентации представляет следующую последовательность: получение данных с измерительного блока, коррекция ошибок и помех, расчёт параметров компенсации текущей среды, вычисление углов Эйлера – Крылова (тангаж, крен, рыскание). Упрощённая схема представлена на рисунке 2.

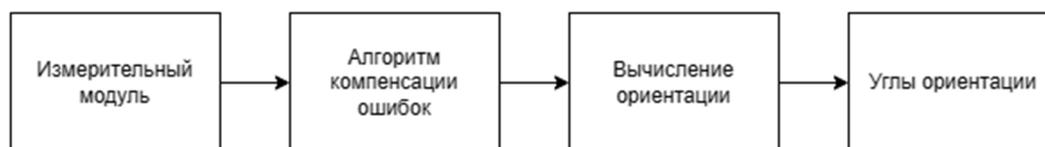


Рисунок 2 – Блок-схема геомагнитной ориентации
Figure 2 – Block diagram of geomagnetic orientation

При комбинировании этих систем объединяется информация о местоположении, полученная с помощью геомагнитных датчиков, с данными от БИНС. Блок-схема такого подхода представлена на рисунке 3.

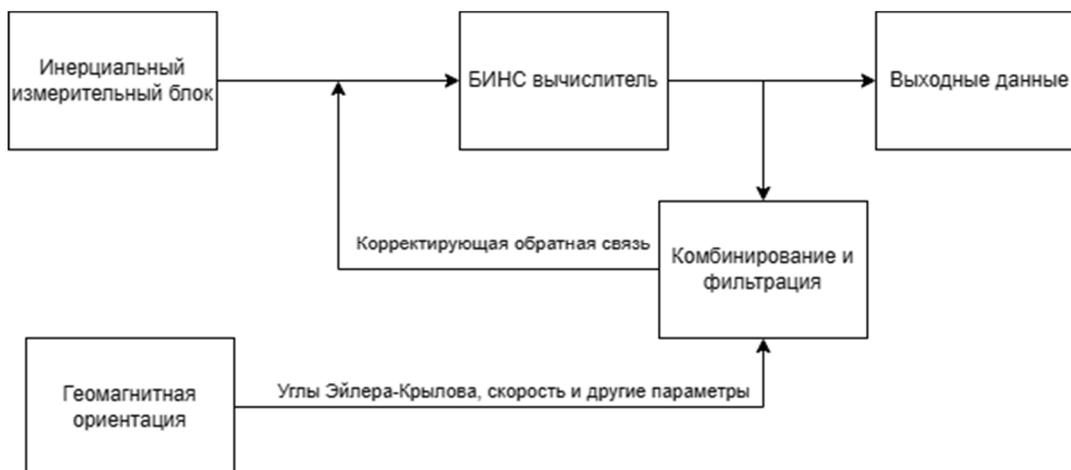


Рисунок 3 – Блок-схема интегрированной навигационной системы
Figure 3 – Block diagram of integrated navigation system

Суть метода заключается в получении избыточной информации от двух и более источников сигнала, обладающих различными спектральными плотностями погрешности.

Принцип работы системы с двумя абстрактными навигационными измерителями заключается в следующем:

$$x_1(t) = x(t) + n_1(t),$$

$$x_2(t) = x(t) + n_2(t),$$

где $x(t)$ – измеряемый навигационный параметр (полезный сигнал), $n_1(t)$ и $n_2(t)$ – погрешности навигационных измерителей, которые определяются стационарными случайными процессами.

Далее с помощью фильтров осуществляется компенсация погрешности, образуя на выходе комплексной навигационной системы сигнал следующего вида:

$$y(s) = \sum_{i=1}^N F_i(s)x_i(s),$$

где $F_i(s)$ – передаточная характеристика i -го фильтра.

При реализации такой комплексной навигационной системы необходимо, чтобы фильтр не вносил динамических погрешностей $x(t)$, т.е. должно выполняться условие инвариантности

$$\sum_{i=1}^N F_i(s) = 1$$

Таким образом, для системы с двумя измерителями уравнение имеет вид

$$y(s) = x(s) + F_1(s)n_1(s) + F_2(s)n_2(s)$$

или с учетом инвариантности

$$y(s) = x(s) + [1 - F_2(s)]n_1(s) + F_2(s)n_2(s).$$

Комбинированная система имеет следующие преимущества.

1. Простая структура.
2. Избыточность информации от двух систем при их комбинации позволяет получить более точные результаты.
3. Обе системы работают независимо, что значительно повышает надежность всей системы.

Также возможно использование дополнительных измерительных устройств и корректирующей информации.

Фильтрация выходных данных

В БИНС существует множество типов системных ошибок выходных данных: ошибка построения вертикали, ошибка определения скорости, ошибка определения пройденного расстояния. Они являются следствием погрешности измерительных устройств, наличия шума квантования, неверного выбора алгоритма решения задачи ориентации и метода интегрирования, а также случайных воздействий.

Возникает задача компенсации ошибок БИНС. Один из пунктов – предварительная калибровка, которая устраняет систематические и предсказуемые ошибки, вызванные, например, неортогональностью осей инерциального измерительного блока, постоянным дрейфом показаний. Далее следует фильтрация, восстановление сигнала и компенсация.

Методы компенсации ошибок БИНС разделяются на три основных подхода:

- 1) корректировка входных данных;
- 2) корректировка выходных данных;
- 3) корректировка выходных данных с обратной связью.

Корректировка входных данных осуществляется на этапе настройки системы или предварительной калибровки измерительного блока. Корректировка выходных данных производится в процессе работы системы. Возможна корректировка с использованием дополнитель-

ных данных от внешних датчиков или систем, например использование сигнала о местоположении со спутника, камер, установленных на борту объекта.

Существует два способа корректировки выходного сигнала. Первый способ реализует непосредственную коррекцию выходных данных с инерциального измерительного блока в соответствии со значением оценки параметров, полученных после фильтрации. Процесс коррекции показан на рисунке 4.

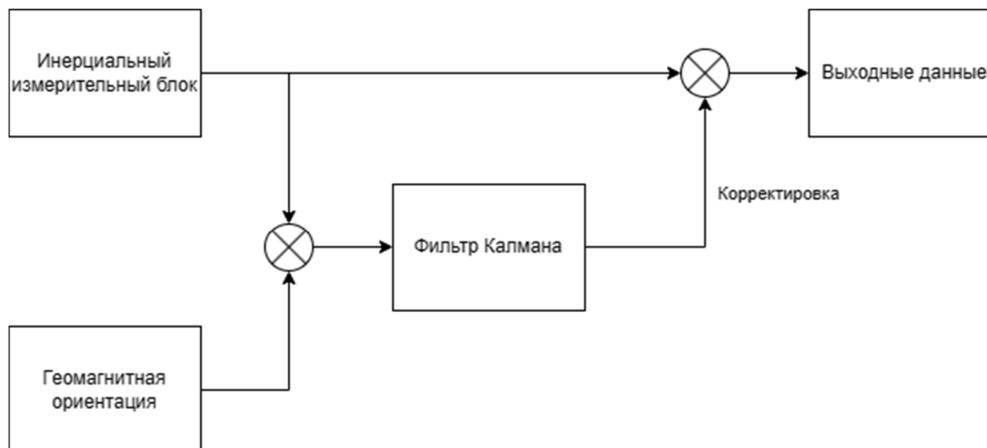


Рисунок 4 – Блок-схема метода коррекции выходного сигнала
Figure 4 – Block diagram of output signal correction method

Метод корректировки выходных данных с обратной связью заключается в передаче оценок параметров сигнала, полученных после фильтрации, в инерциальный измерительный блок для компенсации ошибок и выполнения последующих расчетов в соответствии с исправленными параметрами. Процесс коррекции показан на рисунке 5.

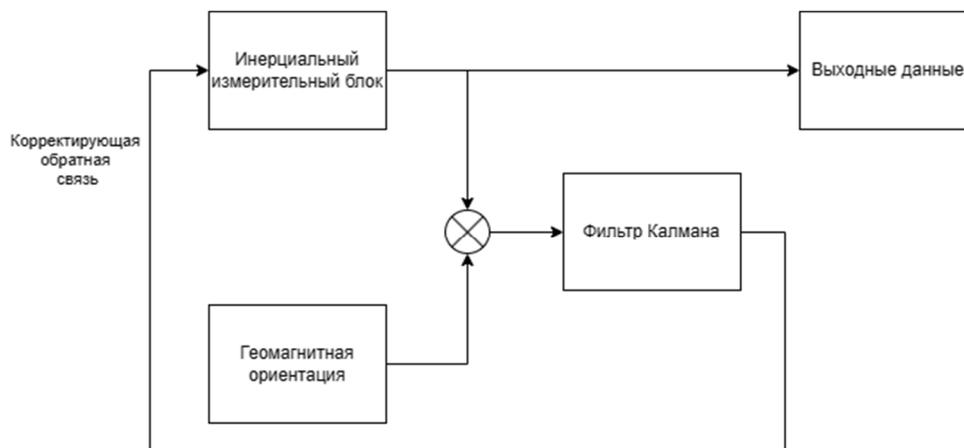


Рисунок 5 – Блок-схема метода коррекции с обратной связью
Figure 5 – Block diagram of feedback correction method

Метод коррекции без обратной связи имеет простую структуру, но не позволяет решить проблему накопления ошибок. При использовании метода коррекции с обратной связью ошибка навигации не будет накапливаться с течением времени [8].

Методы машинного обучения

Методы машинного обучения используются в качестве оценщиков/предсказателей или классификаторов навигационных параметров. В работах [9, 10] представлено использование методов машинного обучения для корректировки входных данных. Эти методы используются в качестве альтернативы фильтру Калмана и упрощают применение новых типов и моделей инерциальных датчиков.

Подход, использующий искусственную нейронную сеть (ИНС) для преодоления ограничений фильтра Калмана, был представлен также в работах [11-14]. Предложенная методология была реализована в два этапа. На первом этапе ИНС обучалась прогнозировать ошибку положения БИНС и удалять ее из соответствующей позиции ИНС, не имея исходного положения БИНС. На втором этапе осуществляется корректировка весовых коэффициентов выходного слоя ИНС на основе ошибки между выводом сетевого алгоритма и желаемым выводом – реальным положением. Таким образом, навигационная система функционирует как БИНС с использованием ИНС корректировки в случае потери сигнала GPS или другого источника, который считается эталонным. Когда имеется эталонный сигнал ИНС корректирует коэффициенты выходного слоя и обучается.

В работах [15-19] использовались самоорганизующаяся нейронная сеть и адаптивная сетевая система нечеткого вывода (ANN и ANFIS) после интеграции GPS/SINS для улучшения результатов решения задачи навигации БИНС. Самоорганизующаяся нейронная сеть (ANN или SONN) – это неконтролируемая модель обучения в искусственной нейронной сети, называемая самоорганизующимися картами объектов или картами Кохонена. Эти карты объектов представляют собой сгенерированную двумерную дискретизированную форму входного пространства во время обучения модели (на основе соревновательного обучения). Это явление очень похоже на биологические системы: в коре головного мозга человека многомерные сенсорные входные пространства (слуховые, моторные, тактильные, визуальные, соматосенсорные и т.д.) представлены двумерными картами. Такое проецирование входных данных более высокой размерности на карты уменьшенной размерности называется сохранением топологии. И это отображение с сохранением топологии может быть достигнуто с помощью самоорганизующихся сетей [20]. Суть использования такого типа ИНС в БИНС заключается в том, что на входе имеется многомерное пространство (данные с множества различных датчиков), на выходе – минимальное по числу измерений, удовлетворяющих требуемым выходным данным, что является одним из методов существенного повышения точности БИНС. Адаптивная сетевая система нечеткого вывода (ANFIS) является универсальным оценщиком, так как её структура позволяет аппроксимировать нелинейные функции, обладает более быстрой сходимостью, чем у обычных нейронных сетей. Данная методика также относится к корректировке выходных данных.

В работе [21] была представлена нелинейная авторегрессионная нейронная сеть с внешними входами (NARX) в сочетании с «неароматизированным» фильтром Калмана (UKF) для повышения точности положения и скорости интеграции SINS/GNSS. Данная ИНС используется в качестве предиктора для прогнозирования следующего значения входного сигнала, то есть корректировка осуществляется также и на входе алгоритмов БИНС и ИНС.

В работе [22] предложен метод «случайного леса» (RF) для распознавания состояния покоя. Данный алгоритм заключается в использовании ансамбля деревьев решений, каждое из которых само по себе даёт невысокую точность, но за счёт их большого количества результат уточняется. Предлагаемый метод зависит от характеристик, генерируемых сигналами инерциального измерительного блока, которые представляют состояние покоя в качестве входных данных для классификатора. Таким образом, метод позволяет определить текущее состояние движения тела для дальнейшей корректировки других фильтров и проведения повторной начальной выставки. Данный подход относится к методу корректировки входных данных, так как производится анализ данных непосредственно с инерциального измерительного блока, без учета выходных данных.

Существует множество и других методов, например ML [23] для использования в БИНС. Они отличаются структурой ИНС, алгоритмом обучения. Применение зависит от конкретной задачи, имеющимися вычислительными ресурсами для её решения и способом обучения ИНС.

Особенности методов повышения точности БИНС с использованием подходов машинного обучения и фильтра Калмана, представлены в сравнительной таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение основных методов фильтрации
Table 1 – Comparison of main filtering methods

Характеристика	Фильтр Калмана	ANFIS	NARX (UKF)	RF
Требования к вычислительным мощностям	высокие	низкие	высокие	низкие
Применение для коррекции входных данных	да	да	нет	да
Применение для коррекции выходных данных	да	да	да	нет

Заключение

Существует множество методов повышения точности БИНС. На смену классическому фильтру Калмана и различных его модификаций приходят методы машинного обучения для дальнейшего улучшения параметров БИНС. В большинстве случаев точность повышается за счет уменьшения размерности решаемых уравнений. Первичные данные с датчиков, такие как время, ускорение, угловая скорость и магнитная индукция, формируют многомерное пространство. Затем это пространство сокращается до минимально необходимого количества измерений за счет введения обратной связи в уравнения ориентации и навигации. Обратная связь может быть введена как на входе, так и на выходе вычислительного модуля. Применение методов машинного обучения для повышения точности измерений является инновационным, но у них есть существенные недостатки, такие как повышенные требования к вычислительной мощности и необходимость обучения нейронной сети с использованием дополнительных внешних датчиков.

Библиографический список

1. **Матвеев В.В.** Инерциальные навигационные системы: учебное пособие – ТулГУ, 2012. 199 с.
2. **Tan X.M., Liu N., Su Z., Wang H.L.** Research on MINS Vehicle Navigation Method Based on Satellite Assist // 2020 China Simulation Conference, Beijing, China. 2020. Pp.158-160.
3. **Yang Y.F., Xie Y.** Simulation Generation Method for Space Target Trajectory of Shipborne TT&C Radar // Telecommunications Technology Journal. 2008. No. 09. Pp.71-74.
4. **Titterton D.H., Weston J.L.** Strap-down Inertial Navigation Technology // 2nd Edition, London: Peter Peregrinus Ltd. Pp.60-80.
5. **Currten K., Currten M.** MEMS Technology and MEMS Sensors Focusing on Inertial Sensors // IC-SICT, Beijing, China. 2008. Pp. 2371-2374.
6. **Abosekeen A., Iqbal U., Noureldin A.** Improved Navigation Through GNSS Outages: Fusing Automotive Radar and OBD-II Speed Measurements with Fuzzy Logic // GPS World. 2021, 32, 36-41.
7. **Пичужкина А.В., Ролдугин Д.С.** Использование моделей геомагнитного поля в задачах ориентации искусственных спутников Земли. Москва. 2016.
8. **Abosekeen A., Iqbal U., Noureldin A.** Enhanced Land Vehicles Navigation by Fusing Automotive Radar and Speedometer Data // In Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020), St. Louise, MO, USA, 21-25 September 2020. Pp. 2206-2219.
9. **Rashed M.A., Abosekeen A., Ragab H., Noureldin A., Korenberg M.J.** Leveraging FMCW-radar for autonomous positioning systems: Methodology and application in downtown Toronto // In Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS+ 2019, Miami, FL, USA, 16-20 September. 2019. Pp. 2659-2669.
10. **Hsu L.T.** What are the roles of artificial intelligence and machine learning in GNSS positioning? // Inside GNSS. 2020. Pp. 1-8.
11. **Sharaf R., Noureldin A., Osman A., El-Sheimy N.** Online INS/GPS Integration with a Radial Basis Function Neural Network // IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag. 2005, 20, 8-14.

12. **Semeniuk L., Noureldin A.** Bridging GPS outages using neural network estimates of INS position and velocity errors // *Meas. Sci. Technol.* 2006, 17, 2783-2798.
13. **Jaradat M.A., Abdel-Hafez M.F., Saadeddin K., Jarrah M.A.** Intelligent fault detection and fusion for INS/GPS navigation system // In Proceedings of the 2013 9th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA), Amman, Jordan, 9-11 April 2013. Pp. 1-5.
14. **Du S., Gan X., Zhang R., Zhou Z.** The Integration of Rotary MEMS INS and GNSS with Artificial Neural Networks // *Math. Probl. Eng.* 2021, 2021, 1-10.
15. **Al Bitar N., Gavrilov A.** A new method for compensating the errors of integrated navigation systems using artificial neural networks // *Measurement.* 2021, 168, 108391.
16. **Abosekeen A., Iqbal U., Noureldin A., Korenberg M.J.** A Novel Multi-Level Integrated Navigation System for Challenging GNSS Environments // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2021, 22, 4838-4852.
17. **Aouf A., Boussaid L., Sakly A.** TLBO-Based Adaptive Neurofuzzy Controller for Mobile Robot Navigation in a Strange Environment // *Comput. Intell. Neurosci.* 2018, 2018, 1-8.
18. **Zhang Y.** A Fusion Methodology to Bridge GPS Outages for INS/GPS Integrated Navigation System // *IEEE Access.* 2019, 7, 61296-61306.
19. **Yue S., Cong L., Qin H., Li B., Yao J.** A Robust Fusion Methodology for MEMS-Based Land Vehicle Navigation in GNSS Challenged Environments // *IEEE Access.* 2020, 8, 44087-44099.
20. ANN – Self Organizing Neural Network (SONN) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geeksforgEEKS.org/ann-self-organizing-neural-network-sonn/> (дата обращения: 12.05.2024).
21. **Tamazin M., Korenberg M.J., Elghamrawy H., Noureldin A.** GPS Swept Anti-Jamming Technique Based on Fast Orthogonal Search (FOS) // *Sensors.* 2021, 21, 3706.
22. **Sabzevari D.; Chatraei A.** INS/GPS Sensor Fusion based on Adaptive Fuzzy EKF with Sensitivity to Disturbances // *IET Radar Sonar Navig.* 2021, 15, 1535-1549.
23. A Machine Learning Approach for an Improved Inertial Navigation System Solution [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/358752049> / (дата обращения: 21.04.2024).

UDC 656.052.16

METHODS FOR INCREASING ACCURACY IN STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

A. E. Kutsev, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0008-8736-0944, e-mail: artem28k@yandex.ru

A. E. Serebryakov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor of RGRTU, Acting Head of the Department of EP RGRTU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0008-8593-7374, e-mail: sea89s@yandex.ru

The article discusses the principles of operation of strapdown inertial navigation systems and provides an overview of methods for filtering and signal recovery, as well as their classification. It also considers the essence of methods to increase the accuracy of navigation systems using input data to form a multidimensional space, which is then reduced to a smaller number of measurements. The use of feedback in classical Kalman filters and neural networks is also discussed.

Keywords: strapdown inertial carbon system, operating principle, filtration, analysis.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-89-31-38

References

1. **Matveev V.V.** *Inercial'nye navigacionnye sistemy: Uchebnoe posobie.* Tula State University. 2012, 199 p. (in Russian).
2. **Tan X.M., Liu N., Su Z., Wang H. L.** Research on MINS Vehicle Navigation Method Based on Satellite Assist. *2020 China Simulation Conference*, Beijing, China. 2020, pp.158-160.
3. **Yang Y.F., Xie Y.** Simulation Generation Method for Space Target Trajectory of Shipborne TT&C Radar. *Telecommunications Technology Journal.* 2008, no. 09, pp.71-74.

4. **Titterton D.H., Weston J.L.** Strap-down Inertial Navigation Technology. *2nd Edition*, London: Peter Peregrinus Ltd, pp. 60-80.
5. **Currten K., Currten M.** MEMS Technology and MEMS Sensors Focusing on Inertial Sensors. *IC-SICT*, Beijing, China. 2008, pp. 2371-2374.
6. **Abosekeen A., Iqbal U., Noureldin A.** Improved Navigation Through GNSS Outages: Fusing Automotive Radar and OBD-II Speed Measurements with Fuzzy Logic. *GPS World*. 2021, 32, 36-41.
7. **Pichuzhkina A.V., Roldugin D.S.** *The use of geomagnetic field models in the problems of orientation of artificial Earth satellites*. Moscow. 2016.
8. **Abosekeen A., Iqbal U., Noureldin A.** Enhanced Land Vehicles Navigation by Fusing Automotive Radar and Speedometer Data. *In Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020)*, St. Louise, MO, USA, 21-25 September. 2020, pp. 2206-2219.
9. **Rashed M.A., Abosekeen A., Ragab H., Noureldin A., Korenberg M.J.** Leveraging FMCW-radar for autonomous positioning systems: Methodology and application in downtown Toronto. *In Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS+*. 2019, Miami, FL, USA, 16-20 September. 2019, pp. 2659-2669.
10. **Hsu L.T.** What are the roles of artificial intelligence and machine learning in GNSS positioning? *Inside GNSS*. 2020, 1-8.
11. **Sharaf R., Noureldin A., Osman A., El-Sheimy N.** Online INS/GPS Integration with a Radial Basis Function Neural Network. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* 2005, 20, 8-14.
12. **Semeniuk L., Noureldin A.** Bridging GPS outages using neural network estimates of INS position and velocity errors. *Meas. Sci. Technol.* 2006, 17, 2783-2798.
13. **Jaradat M.A., Abdel-Hafez M.F., Saadeddin K., Jarrah M.A.** Intelligent fault detection and fusion for INS/GPS navigation system. *In Proceedings of the 2013 9th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*. Amman, Jordan, 9-11 April. 2013, pp. 1-5.
14. **Du S., Gan X., Zhang R., Zhou Z.** The Integration of Rotary MEMS INS and GNSS with Artificial Neural Networks. *Math. Probl. Eng.* 2021, 2021, 1-10.
15. **Al Bitar N., Gavrilov A.** A new method for compensating the errors of integrated navigation systems using artificial neural networks. *Measurement*. 2021, 168, 108391.
16. **Abosekeen A., Iqbal U., Noureldin A., Korenberg M.J.** A Novel Multi-Level Integrated Navigation System for Challenging GNSS Environments. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2021, 22, 4838-4852.
17. **Aouf A., Boussaid L., Sakly A.** TLBO-Based Adaptive Neurofuzzy Controller for Mobile Robot Navigation in a Strange Environment. *Comput. Intell. Neurosci.* 2018, 1-8.
18. **Zhang Y.** A Fusion Methodology to Bridge GPS Outages for INS/GPS Integrated Navigation System. *IEEE Access*. 2019, 7, 61296-61306.
19. **Yue S., Cong L., Qin H., Li B., Yao J.** A Robust Fusion Methodology for MEMS-Based Land Vehicle Navigation in GNSS Challenged Environments. *IEEE Access*. 2020, 8, 44087-44099.
20. **ANN – Self Organizing Neural Network (SONN)** [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.geeksforsgeeks.org/ann-self-organizing-neural-network-sonn/> (data obrashcheniya: 12.05.2024).
21. **Tamazin M., Korenberg M.J., Elghamrawy H., Noureldin A.** GPS Swept Anti-Jamming Technique Based on Fast Orthogonal Search (FOS). *Sensors*. 2021, 21, 3706.
22. **Sabzevari D.; Chatraei A.** INS/GPS Sensor Fusion based on Adaptive Fuzzy EKF with Sensitivity to Disturbances. *IET Radar Sonar Navig.* 2021, 15, 1535-1549.
23. **A Machine Learning Approach for an Improved Inertial Navigation System Solution** [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/358752049> / (data obrashcheniya: 21.04.2024).