

УДК 621.01

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-105

А. Ассад<sup>1</sup>, С.А. Сериков<sup>2</sup>

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАБОРА ДАННЫХ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ**



<sup>1</sup>Ассад Аммар

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

Россия, Санкт-Петербург

Тел.: (906) 712-7237, E-mail: ammar.assad225@gmail.com



<sup>2</sup>Сергей Анатольевич Сериков

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

Россия, Санкт-Петербург

Тел.: (911) 901-5478, E-mail: srkv@inbox.ru.

### **Аннотация**

В данной статье представлен метод генерации данных, моделирующих измерения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для задач оценки ориентации, сгенерированные данные содержат измерения гироскопов, акселерометров и магнетометров в качестве датчиков, а также данные об ориентации, представленные в виде углов Эйлера или кватернионов, характеризующих ориентацию БПЛА. Поскольку многие исследователи запрашивают симулированные полеты БПЛА для оценки своих алгоритмов перед внедрением их в приложения реального времени, это в основном зависит от понимания математической модели датчиков, истинных и реальных измерений при наличии шума. Сгенерированные данные содержат шумы для моделирования реальных полетов с различными режимами полета, как будет подробно объяснено позже. Дрейфы гироскопов и смещения акселерометров также генерируются с шумом. Внешние силы также учитываются в случае режимов полета, таких как маневры, и добавляются к акселерометрам для эмуляции полетов в реальном мире.

*Ключевые слова:* Беспилотные летательные аппараты, гироскопы, акселерометры, магнетометры, углы Эйлера.

## **Введение**

Значение существующих данных для оценки алгоритмов является ключевой проблемой, особенно для областей, зависящих от дорогостоящего оборудования, таких как БПЛА. Кроме того, обеспечение точной ориентации БПЛА является очень базовой проблемой для применения планирования маршрута или отслеживания, поскольку любое движение БПЛА зависит от его ориентации. Исходя из этого, существует необходимость тестировать эти алгоритмы на доступных данных, настраивать их для получения окончательной и наилучшей версии алгоритма, а затем реализовывать его в реальных случаях [1-4].

Целью данного исследования является разработка гибкого программного обеспечения в среде Matlab для генерации данных и их сохранения для исследования алгоритмов, связанных с оценкой ориентации БПЛА, таких как фильтр Калмана, комплементарный фильтр, фьюжн данных и т. д. Они все называются Системами Опоры по Курсу и Углу (AHRS или Курсовертикаль).

Основные задачи данного исследования могут быть определены следующим образом:

- Генерация данных измерений с датчиков (гироскопов, акселерометров и магнетометров).
- Добавление шума к сгенерированным измерениям.
- Расчет реальных параметров ориентации.

В области создания наборов данных для БПЛА наблюдается недостаточное количество исследований. В [5] авторы сгенерировали наборы данных с изображениями траекторий. Самое важное при создании наборов данных - понимание значений данных гироскопов, например, если значения гироскопов постоянны [20 град/час, 0, 0] при наличии угла крена (25 градусов), это означает, что БПЛА совершает круговое движение вокруг определенного центра. При хорошем понимании динамики и движений можно смоделировать множество сценариев.

Результатом данного исследования является программное обеспечение, которое может быть использовано любым исследователем для генерации данных с желаемыми значениями измерений и характеристиками шума

## **Методы**

Данные гироскопов: данные от гироскопов представлены следующим образом [6-7]:

$$G = G_{real} + b_g + n_g$$

$$b_g = b_g + n_{b_g}$$

где  $G_{real}$  - реальные данные,  $n_g$  - шум с нулевым средним и случайным стандартным отклонением (Среднеквадратическое СКО),  $b_g$  - дрейф гироскопов, также имеющий шум с нулевым средним и случайным СКО ( $n_{b_g}$ ).

Случаи измерений гироскопов следующие:

- 1- Постоянное значение.
- 2- Крен: это вызовет углы крена.
- 3- Тангаж: это вызовет углы крена.
- 4- Рыскание: это вызовет углы крена.
- 5- Множественные постоянные значения: это множество постоянных значений, каждое постоянное значение для определенного диапазона времени.

Углы Эйлера или ориентация БПЛА вычисляются напрямую из данных гироскопов. Для магнетометров должно зависеть от реального магнитного поля в соответствии с координатами БПЛА ( $M_{real}$ ), что можно рассчитать с использованием интернета, а затем использовать это значение [8-9].

Для магнетометров и акселерометров реальные измерения должны быть представлены в системе координат тела (БПЛА), где истинные значения не представлены в системе координат тела, такие как магнитное поле и вектор гравитации в каждом месте. Таким образом, матрица  $C_s^b$ , которая преобразует их из их собственной системы координат в систему координат тела, рассчитывается с использованием рассчитанных углов из гироскопов.

Данные акселерометров: данные от акселерометров представлены следующим образом:

$$A = C_s^b A_{real} + A_{ex} + b_a + n_a$$

$$b_a = b_a + n_{b_a}$$

где  $A_{real}$  - реальные данные  $A_{real} = [0, 0, g]^T$ ,  $n_a$  - шум с нулевым средним и случайным СКО,  $b_a$  - дрейф акселерометров, также имеющий шум с нулевым средним и случайным стандартным отклонением ( $n_{b_a}$ ).  $A_{ex}$  - внешние силы.

Данные магнетометров: данные от магнетометров представлены следующим образом:

$$M = C_s^b M_{real} + n_m$$

где  $M_{real}$  - реальные данные,  $n_m$  - шум с нулевым средним и случайным СКО.

Ориентация БПЛА может быть представлена различными способами, такими как углы Эйлера или кватернионы, и конвертация между ними

может быть легко выполнена. Кватернионы предпочтительнее в вычислениях. В то время как углы Эйлера более понятны для человека. Используя модель кватернионов, которая в основном зависит от данных гироскопов, как показано в следующем уравнении [10].

$$\dot{q} = A * q$$

$$A = 0.5 * \begin{pmatrix} 0 & -W_{c1} & -W_{c2} & -W_{c3} \\ W_{c1} & 0 & W_{c3} & -W_{c2} \\ W_{c2} & -W_{c3} & 0 & W_{c1} \\ W_{c3} & W_{c2} & -W_{c1} & 0 \end{pmatrix}$$

$$W_c = 0.5 * (W_{k+1} + W_k)$$

где  $W_c$  - средний вектор текущих значений гироскопа ( $k$ ) и следующих значений гироскопа ( $k + 1$ ).

$$\theta = dt * \sqrt{W_{c1}^2 + W_{c2}^2 + W_{c3}^2}$$

где  $dt$  – интервал дискретизации

$$q_{k+1} = q_k * (\cos(0.5 * \theta) * eye(4) + A * dt)$$

Затем углы Эйлера могут быть вычислены напрямую из кватерниона. Поскольку все измерения доступны, опорная ориентация может быть вычислена на основе истинных измерений гироскопов или истинных измерений акселерометров и магнетометров. Принятые алгоритмы вычисления опорной ориентации должны также использоваться позже при использовании этих данных в алгоритме оценки [12]

## Результаты

Было проведено множество тестовых случаев, значения параметров могут быть легко установлены. Настройки значений приведены в таблице 1

**Таблица 1. Настройки значений**

	Параметр	Значение
Г	$n_g (rad^2.s^{-2})$	$3.10^{-6}$
	$b_g (rad.s^{-1})$	$[-0.0005; 0.0005; -0.0006]$
А	$n_a (m^2.s^{-4})$	0
	$b_a (m.s^{-2})$	$[0.0007; 0.00033; -0.00404]$
М	$n_m (microTesla^2)$	0.04

На приведенных ниже рисунках показаны сгенерированные данные для датчиков и углов ориентации.

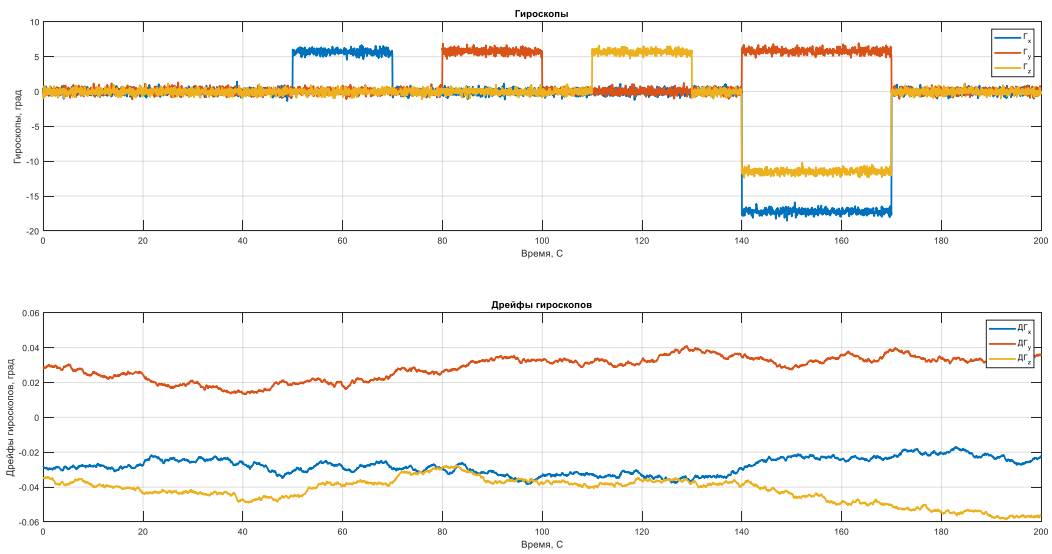


Рис. 1. Измерения гироскопов

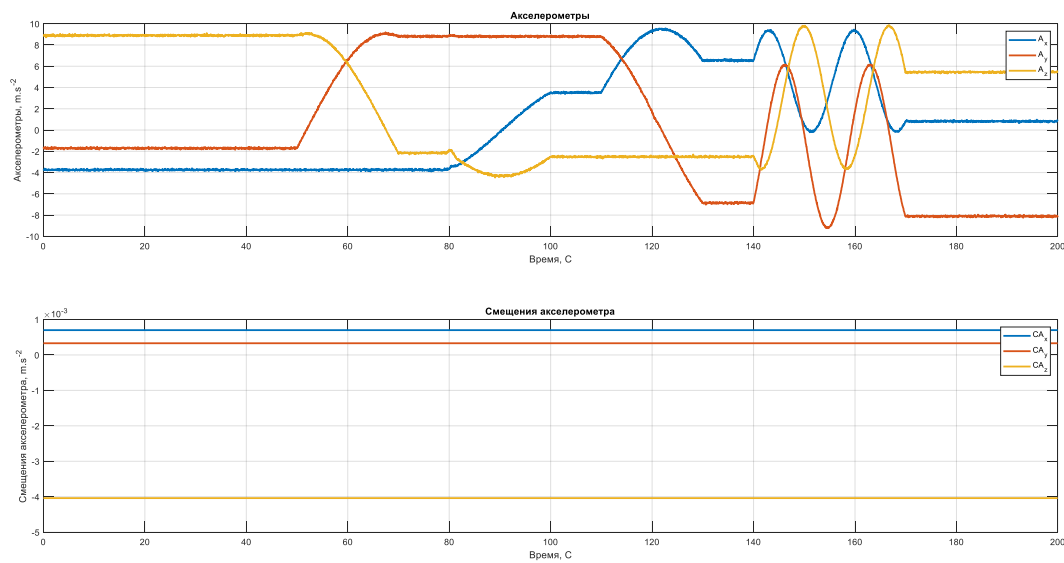
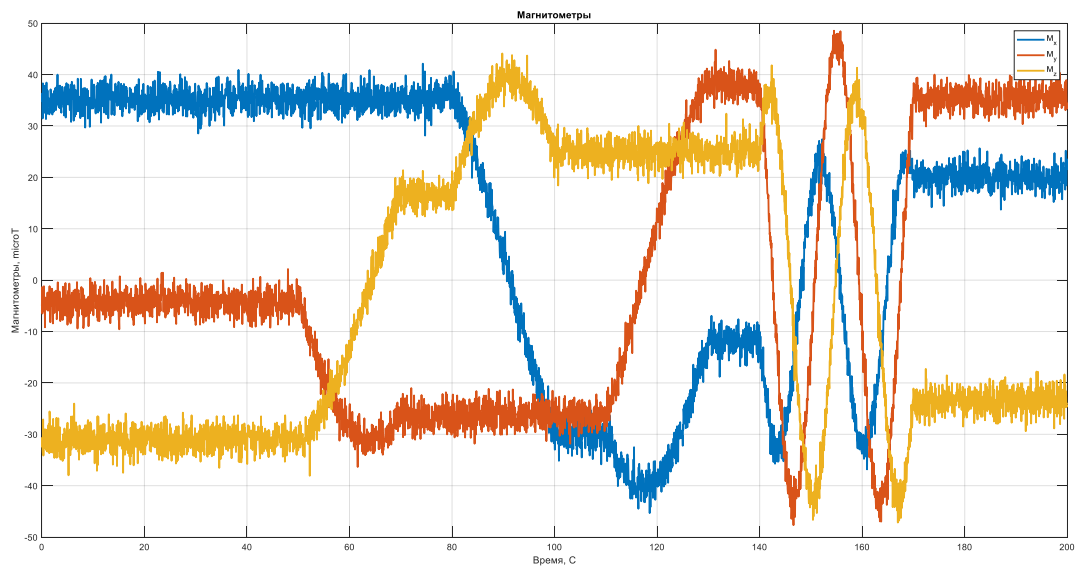
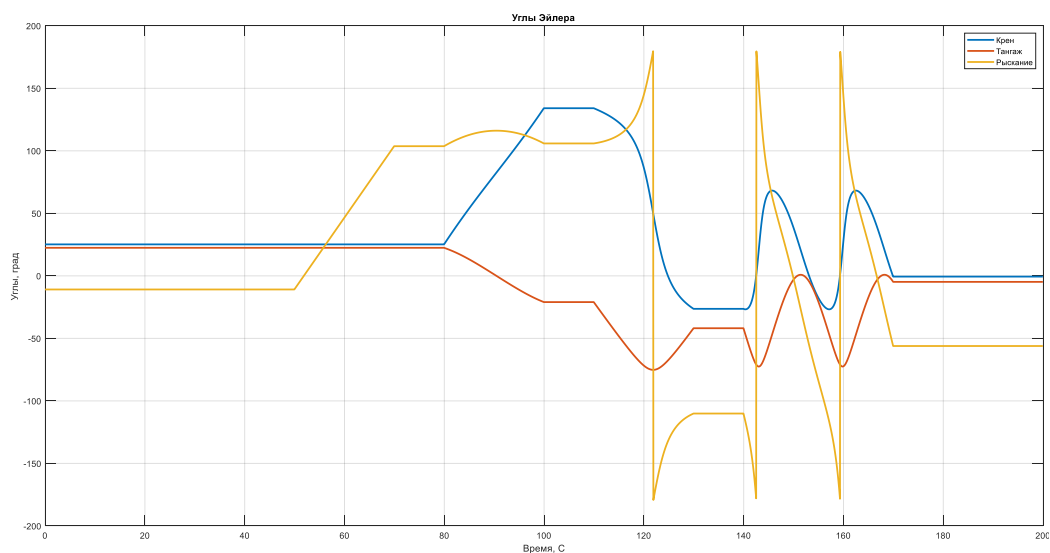


Рис. 2. Измерения акселерометров



**Рис. 3.** Измерения магнитометров



**Рис. 4.** Опорные углы

## Обсуждение

Разработанный метод может быть отредактирован в соответствии с потребностями пользователя, можно добавить любой случай или отредактировать существующий. На рисунках выше показаны результаты множественных случаев, включающих крен, тангаж, рыскание и шумы. Время также может быть отредактировано с желаемым интервалом выборки, что является важным вопросом, поскольку частота дискретизации может отличаться от одного датчика к другому.

Кроме того, ориентация может быть сохранена в виде кватерниона. Ориентация вычисляется без шума, чтобы быть в качестве опорной

ориентации, затем шум измерений будет использоваться алгоритмами для оценки этих ориентаций.

Используя эти представления датчика, данные могут быть сгенерированы и сохранены, а затем использованы для любых алгоритмов оценки ориентации

## **Заключение**

В заключение, данная статья представила подход к генерации набора данных для оценки ориентации БЛА, он содержит измерения от датчиков с реальным представлением шума в этих измерениях. Это будет полезно для исследователей в данной области.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Liang T. et al. Attitude estimation of quadrotor UAV based on QUKF //IEEE Access. – 2023.
- [2] Xiaoqian T. et al. Nonlinear extended Kalman filter for attitude estimation of the fixed-wing UAV //International Journal of Optics. – 2022. – Т. 2022.
- [3] Демидов Д. Н. Исследование алгоритма оценки параметров предполетной ориентации средств управления беспилотного летательного аппарата при мониторинге молодых лесных насаждений //Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – №. 4 (44). – С. 100-111.
- [4] Винокурский Д. Л. и др. Генерация траекторий оптимальных кривых беспилотного летательного аппарата для обхода статического препятствия //Инженерный вестник Дона. – 2021. – №. 9 (81). – С. 169-181.
- [5] Barisic A., Petric F., Bogdan S. Sim2air-synthetic aerial dataset for uav monitoring //IEEE Robotics and Automation Letters. – 2022. – Т. 7. – №. 2. – С. 3757-3764.
- [6] Jalal A. et al. A study of accelerometer and gyroscope measurements in physical life-log activities detection systems //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 22. – С. 6670.
- [7] Alfian R. I., Ma'arif A., Sunardi S. Noise reduction in the accelerometer and gyroscope sensor with the Kalman filter algorithm //Journal of Robotics and Control (JRC). – 2021. – Т. 2. – №. 3. – С. 180-189.
- [8] Justa J., Šmídl V., Hamáček A. Fast AHRS filter for accelerometer, magnetometer, and gyroscope combination with separated sensor corrections //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 14. – С. 3824.
- [9] Minligareev V. T. et al. Geophysical support of magnetometer autonomous navigation systems //2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – IEEE, 2020. – С. 1-4.

- [10] Yuan X. et al. Quaternion-based unscented Kalman filter for accurate indoor heading estimation using wearable multi-sensor system //Sensors. – 2015. – Т. 15. – №. 5. – С. 10872-10890.
- [11] Zhou Q. et al. A novel adaptive Kalman filter for Euler-angle-based MEMS IMU/magnetometer attitude estimation //Measurement Science and Technology. – 2021. – Т. 32. – №. 4. – С. 045104.
- [12] Bernardes E., Viollet S. Quaternion to Euler angles conversion: A direct, general and computationally efficient method //Plos one. – 2022. – Т. 17. – №. 11. – С. e0276302.
- [13] Ioannidou S., Pantazis G. Helmert transformation problem. From Euler angles method to quaternion algebra //ISPRS international journal of geo-information. – 2020. – Т. 9. – №. 9. – С. 494.
- [14] Mouton H. D. Comparison of body rotations using Euler angles and quaternions. – 2021.
- [15] Малкова Л. Е., Кольшикина Н. С. Визуализация кватернионов //Modern Science. – 2020. – №. 6-2. – С. 285-289.

A. Assad, S.A. Serikov

## **MODELING SENSORS OF UAV FOR GENERATING DATASET OF SIMULATED EXPERIMENTS TO EVALUATE ALGORITHMS OF ATTITUDE ESTIMATION**

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia

### **Abstract**

This article illustrates a method for generating data that simulates Unmanned Aerial Vehicles (UAV) measurements for attitude estimation problems, the generated data contains measurement of Gyroscopes, Accelerometers and Magnetometers as sensors, it also contains the attitude data which represent the UAV orientation as Euler angles or Quaternion. Since many researchers ask for simulated trips of UAV to evaluate their algorithms before implementing them in real-time applications. This depends basically on understanding the mathematical model of sensors, the true and real measurement with the existence of noise. The generated data contains noises to simulate real trips with different flight modes as it will be explained in details later. Gyroscopes drifts and Accelerometers biases are also generated with noises. External forces are also considered in case of flight modes such as maneuvers and added to accelerometers to emulate real world trips.



*Key words:* Unmanned Aerial Vehicles, Gyroscopes, Accelerometers, Magnetometers, Euler angles.

## REFERENCES

- [1] Liang T. et al. Attitude estimation of quadrotor UAV based on QUKF //IEEE Access. – 2023.
- [2] Xiaoqian T. et al. Nonlinear extended Kalman filter for attitude estimation of the fixed-wing UAV //International Journal of Optics. – 2022. – T. 2022.
- [3] Demidov D. N. Untersuchung des algorithmus zur bewertung der parameter der vorflugorientierung der steuergeräte eines unbemannten flugzeugs bei der überwachung junger waldpflanzungen // Forsttechnisches Journal. – 2021. - T. 11. – №. 4 (44). - S. 100-111 (rus).
- [4] Vinokursky D. L. et al. Erzeugung optimaler Kurven eines unbemannten Flugzeugs zur Umgehung eines statischen Hindernisses //Don's Engineering Bulletin. – 2021. – №. 9 (81). - S. 169-181 (rus).
- [5] Barisic A., Petric F., Bogdan S. Sim2air-synthetic aerial dataset for uav monitoring //IEEE Robotics and Automation Letters. – 2022. – T. 7. – №. 2. – C. 3757-3764.
- [6] Jalal A. et al. A study of accelerometer and gyroscope measurements in physical life-log activities detection systems //Sensors. – 2020. – T. 20. – №. 22. – C. 6670.
- [7] Alfian R. I., Ma'arif A., Sunardi S. Noise reduction in the accelerometer and gyroscope sensor with the Kalman filter algorithm //Journal of Robotics and Control (JRC). – 2021. – T. 2. – №. 3. – C. 180-189.
- [8] Justa J., Šmídl V., Hamáček A. Fast AHRS filter for accelerometer, magnetometer, and gyroscope combination with separated sensor corrections //Sensors. – 2020. – T. 20. – №. 14. – C. 3824.
- [9] Minligareev V. T. et al. Geophysical support of magnetometer autonomous navigation systems //2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – IEEE, 2020. – C. 1-4.
- [10] Yuan X. et al. Quaternion-based unscented Kalman filter for accurate indoor heading estimation using wearable multi-sensor system //Sensors. – 2015. – T. 15. – №. 5. – C. 10872-10890.
- [11] Zhou Q. et al. A novel adaptive Kalman filter for Euler-angle-based MEMS IMU/magnetometer attitude estimation //Measurement Science and Technology. – 2021. – T. 32. – №. 4. – C. 045104.
- [12] Bernardes E., Viollet S. Quaternion to Euler angles conversion: A direct, general and computationally efficient method //Plos one. – 2022. – T. 17. – №. 11. – C. e0276302.
- [13] Ioannidou S., Pantazis G. Helmert transformation problem. From Euler angles method to quaternion algebra //ISPRS international journal of geo-information. – 2020. – T. 9. – №. 9. – C. 494.

- [14] Mouton H. D. Comparison of body rotations using Euler angles and quaternions. – 2021.
- [15] Malkova L. E., Kolyskina N. S. Visualisierung von Quaternionen //Modern Science. – 2020. – №. 6-2. - S. 285-289 (rus).