

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОТЛАДКИ АЛГОРИТМОВ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А.В. Матерухин<sup>1\*</sup>, Я.Я. Месенгисер<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

\* a\_materuhin@miigaik.ru

**Цитирование:** Матерухин А.В., Месенгисер Я.Я. Имитационное моделирование потоков пространственно-временных данных для отладки алгоритмов диспетчеризации беспилотных воздушных судов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65. № 6. С. 692-699. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-6-692-699

**Ключевые слова.** пространственно-временные данные, синтетические наборы данных, имитационное моделирование, беспилотные воздушные суда.

## Аннотация

Рост количества беспилотных воздушных судов (БВС), одновременно находящихся в воздушном пространстве, вызывает необходимость разработки и тестирования систем, предназначенных для контроля над соблюдением правил и ограничений, касающихся полетов воздушных судов. Эти системы должны обеспечивать как мониторинг полетов отдельных БВС, так и контроль соблюдения полетного режима крупными беспилотными авиационными системами (БАС). Такие системы диспетчеризации призваны обеспечивать безопасную работу большого количества (тысяч и даже десятков тысяч) БВС. В настоящей статье описан подход к тестированию систем диспетчеризации БВС – подготовка синтетических наборов данных с помощью имитационного моделирования потоков пространственно-временных данных о местоположении беспилотных воздушных судов. Предложенный в работе подход не является дорогостоящим, позволяет масштабирование и легко воспроизводим. Авторами было разработано и реализовано решение для подготовки таких синтетических наборов данных.

## 1 Введение

В последнее время происходит быстрое увеличение и расширение сфер применения беспилотных воздушных судов (БВС). Они уже широко используются в поисково-спасательных операциях, при пожаротушении, для обеспечения охраны правопорядка и управления работами в случае ликвидации последствий стихийных бедствий. Появляются и новые сферы их применения - точное земледелие [1, 2] и мониторинг инфраструктуры [3].

Однако увеличение количества БВС и расширение сфер их применения вызывает и рост числа инцидентов с участием БВС. Так, например, в источнике [4] утверждается, что полеты БВС в непосредственной близости от аэропортов вызывают серьезные сбои в его нормальной работе, увеличивая риск несчастных случаев для пилотируемых воздушных судов. Полеты БВС над густонаселенными городскими районами сопряжены с риском для населения на земле, поэтому такие полеты должны регулироваться некоторым набором правил. Кроме того, полеты БВС должны выполняться с учетом ряда ограничений – так, например, полет не должен проходить над определенными пространственными зонами, такими как территории атомных электростанций или военных объектов.

Таким образом, рост количества БВС, одновременно находящихся в воздушном пространстве, вызывает необходимость разработки и тестирования систем, предназначенных для контроля над соблюдением правил и ограничений, касающихся полетов воздушных судов. Такие системы должны обеспечивать как мониторинг полетов отдельных БВС, так и контроль соблюдения полетного режима крупными беспилотными авиационными системами (БАС). Быстрый рост количества БВС приведет к тому, что такие системы диспетчеризации призваны обеспечивать безопасную работу большого количества (тысяч и даже десятков тысяч) БВС.

В настоящее время работоспособность и эффективность таких систем проверяется путем выполнения реальных сценариев с участием реальных БВС. Тестирование такого рода является дорогостоящим, ограниченным, трудно масштабируемым и плохо воспроизводимым. По мнению авторов настоящей статьи, тестирование систем диспетчеризации БВС следует проводить на специально подготовленных наборах данных. Такие данные можно получить с помощью имитационного моделирования потоков пространственно-временных данных о местоположении беспилотных воздушных судов.

Системы диспетчеризации БВС должны в режиме реального времени обрабатывать данные о местоположении большого количества БВС и БАС, находящихся в воздухе, и на основании этой обработки выявлять сложные события. Для отладки алгоритмов такой обработки необходимы наборы данных с различными заданными параметрами, которые к тому же должны прогнозируемо изменяться в соответствии с задачами, решаемыми на этом этапе отладки. Это такие параметры как, например, интенсивность потоков данных, количество этих потоков, частота наступления контролируемых сложных событий и так далее. Проблема состоит в том, что такие наборы данных трудно (а в некоторых случаях даже невозможно) получить, используя реальные БВС.

Предлагаемый авторами подход к решению этой проблемы состоит в имитационном моделировании потоков пространственно-временных данных о местоположении беспилотных воздушных судов. Предлагаемое авторами решение заключается в создании синтетических наборов данных с заданными параметрами.

Различные варианты моделирования различных аспектов, связанных с полетами воздушных судов уже рассматривались в публикациях [5-10]. В источнике [5] описано моделирование полета мультироторного беспилотного летательного аппарата в пакете программ MatLab / Simulink. Результаты этого моделирования, по утверждению авторов публикации, были использованы для отработки режимов полета реального мультироторного беспилотного летательного аппарата. В [6] описан предложенный авторами способ имитационного моделирования полета вертолета в режиме «вихревое кольцо». При моделировании характеристик нагружения несущего винта при опасном снижении вертолета ими были использованы искусственные нейронные сети. Работа [7] представляет собой обзор и сравнительный анализ различных средств моделирования динамики полета, которые позволяют сформировать динамические свойства и характер движения различных воздушных судов. В [8] описано имитационное моделирование выполнения пространственных маневров самолетом. Как указывают авторы [8], результаты такого моделирования позволяют значительно сократить временные и финансовые затраты на определение маневренных характеристик самолета. В [9] приведены результаты моделирования системы управления полетом одиночного БВС типа «квадрокоптер» в среде Simulink / MATLAB. Целью этого моделирования было воспроизвести динамику полета реального БВС для оценки системы управления

квадрокоптером. В работе [10] также были описаны результаты моделирования системы управления полетом одиночного БВС типа «квадрокоптер», но уже в среде динамического моделирования SiminTech. Полученные результаты моделирования, как отмечают авторы [10], позволяют воспроизвести динамику полета реального физического объекта и произвести оценку системы управления БВС.

Таким образом, приведенный выше небольшой обзор научных публикаций показывает, что применение метода имитационное моделирования различных потоков данных о движении воздушных судов для исследования различных аспектов их поведения не является чем-то совершенно новым или оригинальным. Однако ранее при помощи этого метода моделировалось и исследовалось только индивидуальное поведение воздушного судна, однако предлагаемый авторами подход предполагает имитационное моделирование потоков пространственно-временных данных о поведении большого количества беспилотных воздушных судов, находящихся в воздушном пространстве над некоторой территорией.

## 2 Материалы и методы

В целях проверки реализуемости описанного подхода авторами настоящей статьи была разработана программа «Симулятор полета БВС», которая создает синтетический набор пространственно-временных данных с имитацией данные, поступающие в систему диспетчеризации. Предполагается, что эта система диспетчеризации контролирует некоторую зону наблюдения, представляющую собой воздушное пространство над полигоном на сфере.

Данные, поступающие в систему диспетчеризации – это кортежи со следующей схемой: время получения данных о местоположении; данные о местоположении БВС; идентификатор БВС.

Данные о местоположении каждого БВС поступают с определенной частотой, которая задается настройками программы.

Каждое имитируемое БВС относится к некоторому классу. Для каждого класса задаются следующие параметры:

- частота отправки БВС данных о своем местоположении;
- минимально допустимая скорость полета БВС;
- максимально допустимая скорость полета БВС;
- минимально допустимая высота полета БВС;
- максимально допустимая высота полета БВС;
- максимально допустимое ускорение БВС;

- максимально допустимое значение модуля отрицательного ускорения;
- максимальный угол тангажа БВС;
- максимально допустимый угол изменения курса полета БВС.

Предполагается, что каждое БВС может совершать следующие маневры (в рамках характеристик своего класса):

- увеличение скорости полета;
- уменьшение скорости полета;
- изменение курса;
- изменение угла тангажа.

Реализованная в программе модель предполагает, что имитируемое БВС может войти в контролируемое системой диспетчеризации воздушное пространство с любого направления. Маневры, выполняемые каждым имитируемым БВС, определяются с помощью программного генератора случайных значений с учетом ограничений, заданных для БВС этого класса.

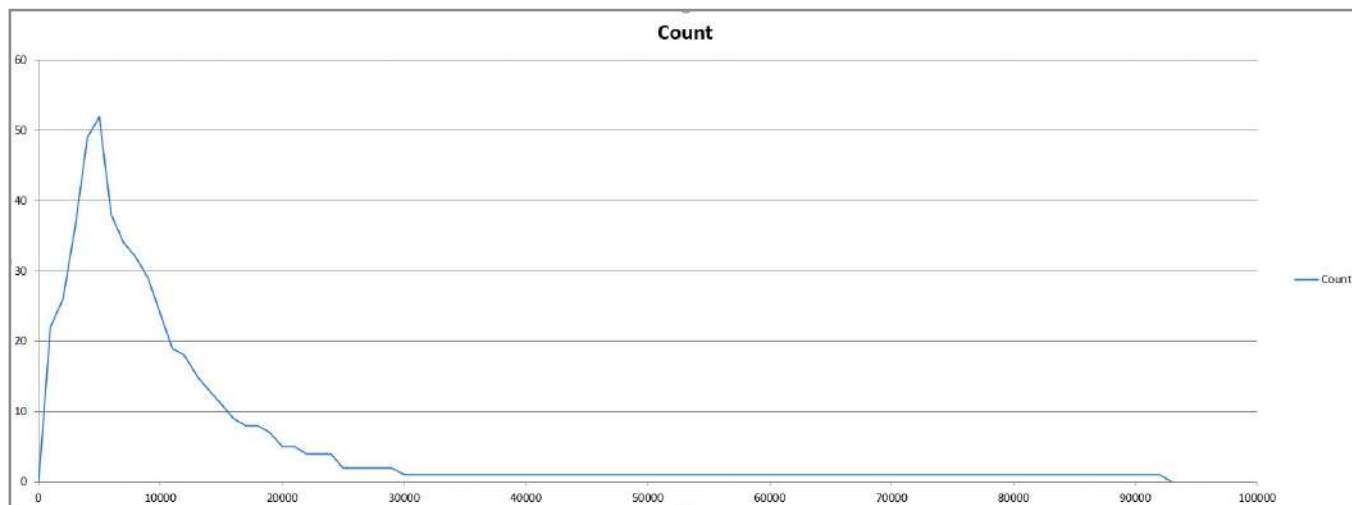
## 3 Результаты

В процессе подготовки данных для отладки алгоритмов диспетчеризации были обнаружены некоторые проблемы. Для нагрузочного тестирования системы диспетчеризации в некоторых случаях необходимо, чтобы количество БВС в зоне наблюдения во время тестирования не выходило за пределы определенного диапазона. В первоначально реализованной модели количество БВС в зоне наблюдения с течением времени уменьшалось, поскольку после достижения заданного количества генерация новых БВС прекращалась, а их вылет за пределы зоны наблюдения продолжался.

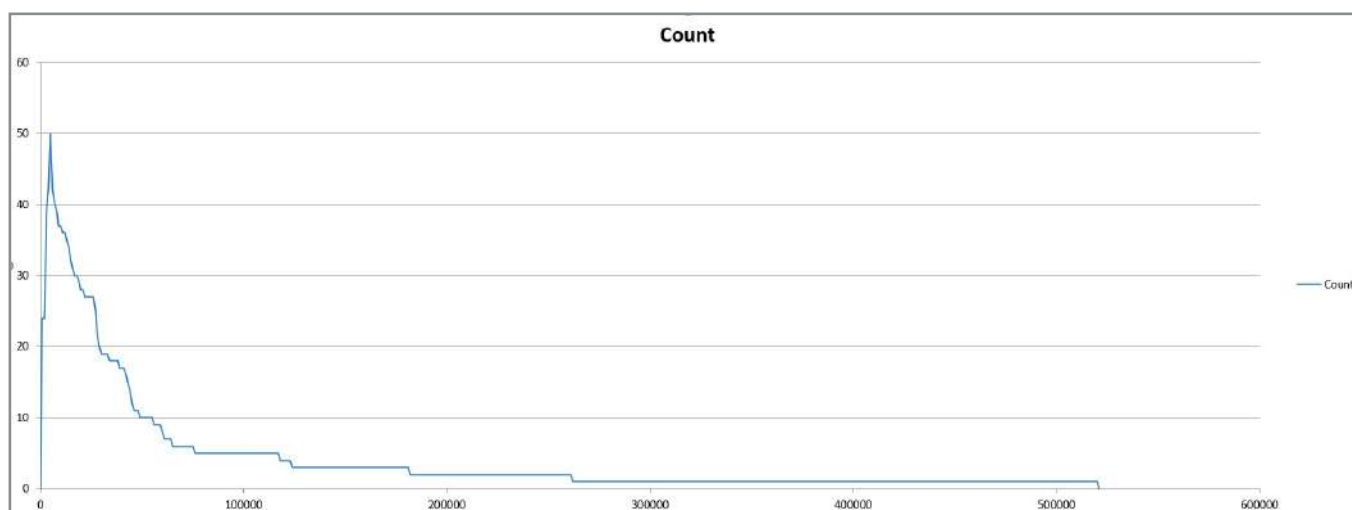
Графики количества БВС в зоне наблюдения представлены на рисунках 1, 2, 3, 4, 5 и 6. По горизонтали - время, по вертикали – количество созданных БВС.

Для устранения этой проблемы необходимо реализовать инструмент, который позволяет в нужный момент времени добавлять новые имитируемые БВС.

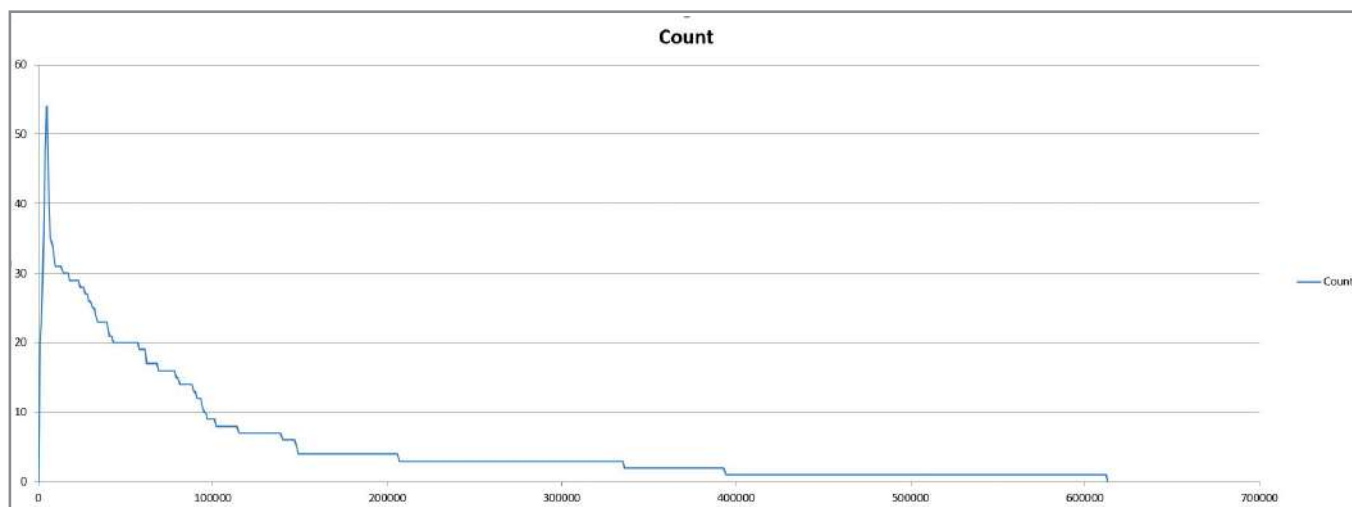
Так как маневры, выполняемые каждым имитируемым БВС, определяются с помощью программного генератора случайных значений с учетом ограничений, заданных для БВС этого класса, то момент времени для добавления новых имитируемых БВС возможно определить статистически. Однако данный подход является ресурсоемким, так как для всевозможных комбинаций входных параметров потребуется провести большое количество запусков программы.



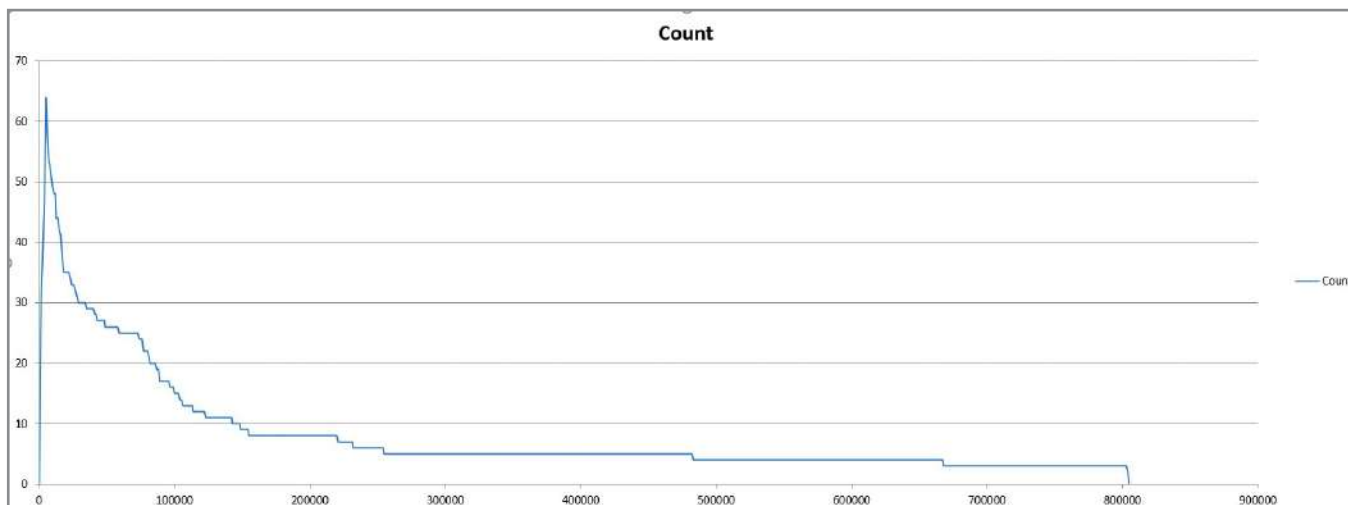
**Рис. 1.** Количество БВС: 100; сторона зоны наблюдения: 1 км; срез по времени: 0 мс – 100 000 мс; отсчеты – каждые 1000 мс.



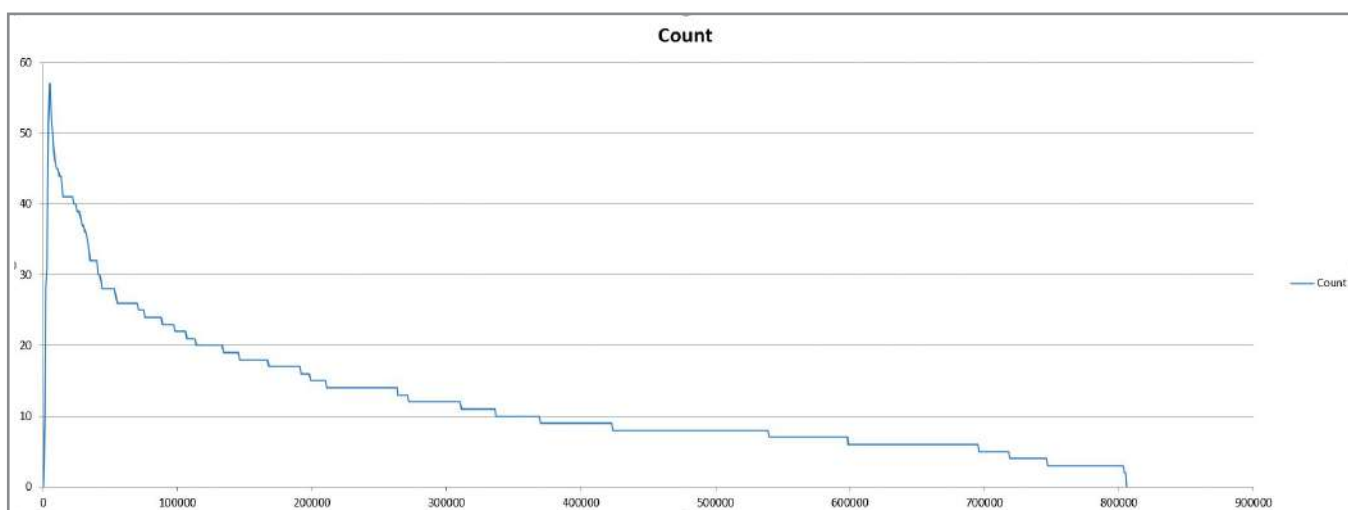
**Рис. 2.** Количество БВС: 100; сторона зоны наблюдения: 5 км; срез по времени: 0 мс – 600 000 мс; отсчеты – каждые 1000 мс.



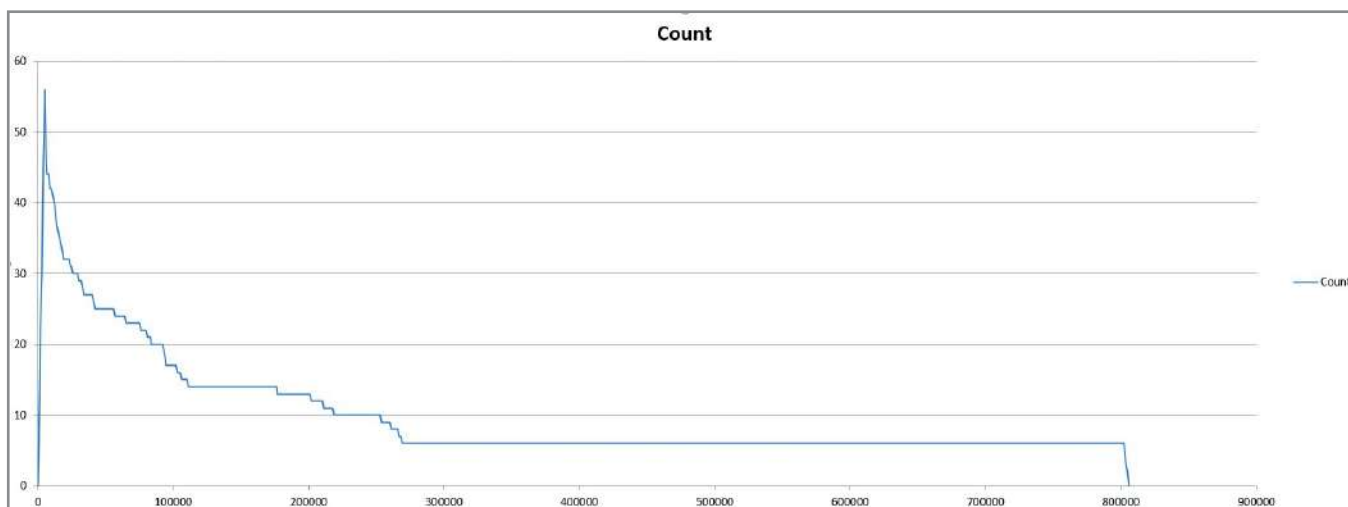
**Рис. 3.** Количество БВС: 100; сторона зоны наблюдения: 10 км; срез по времени: 0 мс – 700 000 мс; отсчеты – каждые 1000 мс.



**Рис. 4.** Количество БВС: 100; сторона зоны наблюдения: 25 км; срез по времени: 0 мс – 900 000 мс; отсчеты – каждые 1000 мс.



**Рис. 5.** Количество БВС: 100; сторона зоны наблюдения: 50 км; срез по времени: 0 мс – 900 000 мс; отсчеты – каждые 1000 мс.



**Рис. 6.** Количество БВС: 100; сторона зоны наблюдения: 100 км; срез по времени: 0 мс – 900 000 мс; отсчеты – каждые 1000 мс.

Предлагаемый авторами подход к решению данной проблемы предполагает наличие оператора – человека, запускающего программу. После выполнения программы оператору предлагается ознакомиться с графиком количества БВС. Примеры таких представлений на Рисунках 1 – 6. Оператор, ознакомившись с графиком, самостоятельно принимает решение о моменте времени для добавления новых имитируемых БВС, и повторно запускает программу «Симулятор полета БВС» с указанием момента времени добавления новых имитируемых БВС.

На Рисунке 7 мы видим результаты добавления БВС в различные моменты времени: 0 мс (по умолчанию), 5000 мс и 10000 мс.

## 4 Выводы

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенный подход к отладке алгоритмов диспетчеризации беспилотных воздушных судов с помощью подготовленных синтетических наборов данных, которые получены с помощью имитационного моделирования потоков пространственно-временных данных о местоположении беспилотных воздушных судов, не является дорогостоящим, позволяет легкое масштабирование и легко воспроизводим. Авторами было разработано и реализовано решение для подготовки таких синтетических наборов данных. В статье описаны некоторые проблемы, связанные с реализацией этого решения и принятые проектные решения.

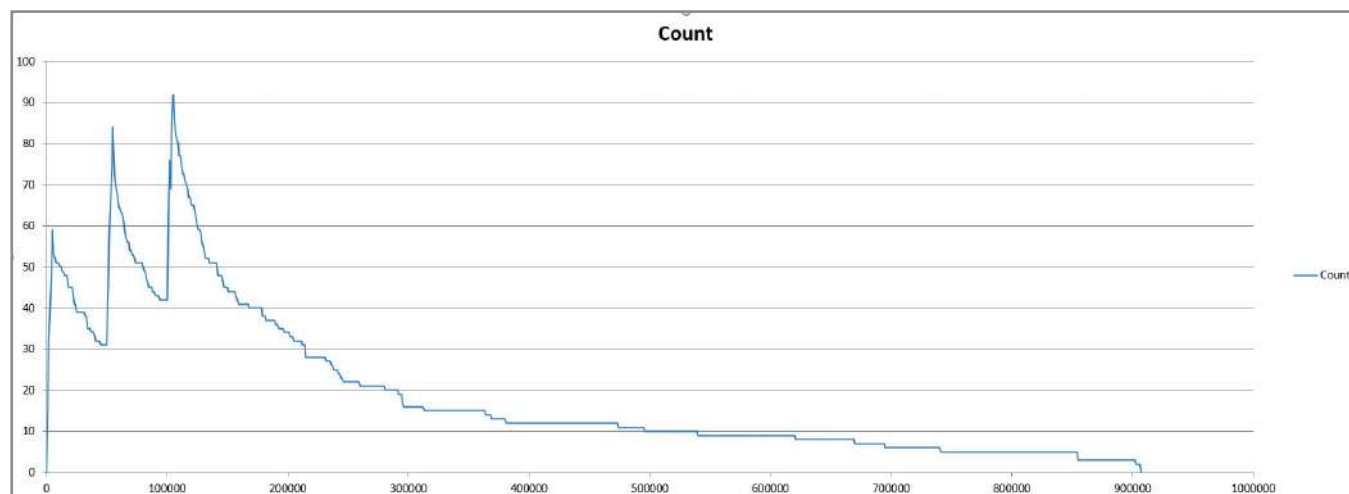


Рис. 7. График общего количества БВС в рамках всей сессии работы с программой

## Благодарности

Результаты были получены в рамках государственного задания 0708-2020-0001 Минобрнауки России.

## Библиография

1. Murugan D., Garg A., Ahmed T., Singh D. Fusion of drone and satellite data for precision agriculture monitoring // Proceedings of 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2016. pp. 910-914. doi: 10.1109/ICIINFS.2016.8263068.
2. Worakuldrongdej P., Maneewam T., Ruangwiset A. Rice Seed Sowing Drone for Agriculture // Proceedings of 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2019. pp. 980-985. doi: 10.23919/ICCAS47443.2019.8971461.
3. Ashour R.K., Taha T., Mohamed F.A., Hableel E., Abu-Kheil Y., Elsalamouny M., Kadadha M., Rangan K., Dias J., Seneviratne L.D., Cai G. Site inspection drone: A solution for inspecting and regulating construction sites // Proceedings of IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 2016. pp. 1-4. doi: 10.1109/MWSCAS.2016.7870116.
4. How the Gatwick Drone Incident Resulted in Dozens of Diversions – [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://nats.aero/blog/2019/05/how-the-gatwick-drone-incident-resulted-in-dozens-of-diversions/> (дата обращения: 28.10.2021).
5. Исаев А.М., Линец Г.И., Исаев М.А., Мельников С.В. Программно-аппаратный комплекс имитационного моделирования полета мультироторного БЛА // Инфокоммуникационные технологии, 2020, т. 18, №. 2, с. 177-187. doi: 10.18469/ikt.2020.18.2.08.

6. Торопов М.Ю., Степанов С.Я. Имитационное моделирование полета вертолета на режиме вихревого кольца // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника, 2016, № 4, с. 72-76.
7. Караванский А.Н., Логинов А.В. Анализ программных средств имитационного моделирования полетов летательных аппаратов // Интеллектуальные информационные технологии. Труды международной научно-практической молодежной конференции, 2016, с. 174-178.
8. Костин П.С., Чеботарев А.Н. Программно-моделирующий комплекс для исследования интегральных характеристик маневренности самолета // Известия института инженерной физики, 2017, № 4, с. 38-45.
9. Калягин М.Ю., Волошин Д.А., Мазаев А.С. Моделирование системы управления полетом квадрокоптера в среде Simulink и Simscape Multibody // Труды МАИ, 2020, № 112. doi: 10.34046/aumsuomt99/22.
10. Малахов С.О., Оленко Ф.Ф. Моделирование динамики полета беспилотных летательных аппаратов в среде динамического моделирования simintech // Эксплуатация морского транспорта, 2021, № 2, с. 151-156. doi: 10.34046/aumsuomt99/22.

**Матерухин Андрей Викторович**

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК); Кафедра информационно-измерительных систем; Факультет геоинформатики и информационной безопасности; доктор технических наук

ORCID: 0000-0002-9576-9925

**Месенгисер Якоб Яковович**

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК); Кафедра информационно-измерительных систем; Факультет геоинформатики и информационной безопасности

ORCID: 0000-0002-6674-4374

Поступила 29.09.2021. Рецензия получена 07.12.2021. Принята к публикации 20.12.2021

UDC 004.62

DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-6-692-699

## SIMULATION OF SPATIAL DATA STREAMS TO TEST FLIGHT DISPATCHING ALGORITHMS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

**Andrei V. Materukhin<sup>1\*</sup>, Yakob Ya. Mesengiser<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

\* a\_materuhin@miigaik.ru

**Citation:** Materukhin AV, Mesengiser YaYa. Simulation of spatial data streams to test flight dispatching algorithms for unmanned aerial vehicles. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. Moscow. 2021;65(6): 692-699. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-6-692-699

**Keywords.** spatial data, synthetic datasets, simulation technique, unmanned aerial vehicles.

**Abstract.** Recently, there has been a rapid growth and expansion of the scope of application of unmanned aerial vehicles (UAVs). However, the increase in the number of UAVs and the expansion of their scope of application also causes an increase in the number of incidents involving UAVs. Thus, an increase in the number of UAVs simultaneously in airspace requires the development and testing of systems designed to monitor compliance with the rules and restrictions associated with aircraft flights. The rapid growth in the number of UAVs will necessarily lead to the fact that such dispatch systems will have to ensure the safe operation of a large number (thousands and even tens of thousands) of UAVs. Currently, the operability and efficiency of such systems is being tested on real scenarios with the participation of real UAVs. This type of testing is expensive, limited, difficult to scale, and poorly reproducible. This article proposes an alternative approach to testing the dispatch systems of the UAV – debugging and testing on prepared synthetic datasets. It is proposed to form these sets using the simulation of spatial data streams for debugging of flight dispatching algorithms for unmanned aerial vehicles. The authors have developed and implemented a solution for preparing such synthetic datasets.

**References**

1. Murugan D, Garg A, Ahmed T, Singh D. Fusion of drone and satellite data for precision agriculture monitoring. 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS). 2016; pp. 910-914. doi: 10.1109/ICIINFS.2016.8263068.
2. Worakuldumrongdej P, Maneewam T, Ruangwiset A. Rice Seed Sowing Drone for Agriculture. 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). 2019; pp. 980-985, doi: 10.23919/ICCAS47443.2019.8971461.
3. Ashour RK, Taha T, Mohamed FA, Hableel E, et al. Site inspection drone: A solution for inspecting and regulating construction sites. 2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 1-4. doi: 10.1109/MWSCAS.2016.7870116.
4. How the Gatwick Drone Incident Resulted in Dozens of Diversions. Available online: <https://nats.aero/blog/2019/05/how-the-gatwick-drone-incident-resulted-in-dozens-of-diversions/> (accessed on 28. 10.2021).
5. Isaev AM, Linets GI, Isaev MA, Melnikov SV. Software and hardware complex for simulation of flight of a multirotor UAV. Infokommunikacionnye tehnologii. 2020;18(2): 177–187. doi: 10.18469/ikt.2020.18.2.08.
6. Toropov MYu., Stepanov SYa. Modeling of Helicopter Flight Imitation in the Vortex Ring State. Russian Aeronautics. 2016;4: 72-76.
7. Karavanskiy AN, Loginov AV. The analysis of software for imitation modeling of flight aircraft. Intelligent Information Technologies. Proceedings of the international scientific and practical youth conference, 2016, pp. 174-178.
8. Kostin PS, Chebotarev AN. Software-simulating complex for integral research aircraft maneuverability. Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki. 2017;4: 38-45.
9. Kalyagin MYu, Voloshin DA, Mazaev AS. Quadcopter flight control system simulation in Simulink and Simscape Multibody. Trudy MAI, No. 112. doi: 10.34046/aumsuomt99/22.
10. Malakhov SO, Olenko FF. Modeling the dynamics of the flight of unmanned aerial vehicles in the dynamic simulation environment Simintech. Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2021;2: 151-156. doi: 10.34046/aumsuomt99/22

**Andrei V. Materukhin**

Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK); Department of Data Acquisition Systems; Faculty of Geoinformatics and Information Security; Doctor of Engineering  
ORCID: 0000-0002-9576-9925

**Yakob Ya. Mesengiser**

Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK); Department of Data Acquisition Systems; Faculty of Geoinformatics and Information Security  
ORCID: 0000-0002-6674-4374

Received 2021.09.29. Revised 2021.12.07. Accepted 2021.12.20