

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, ФОРМИРУЮЩЕЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Романов Дмитрий Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»¹.

E-mail: radon81@mail.ru.

Михеев Кирилл Валерьевич

кандидат технических наук, инженер-конструктор АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов»².

E-mail: kiri-mikheev@yandex.ru.

Пальманов Владислав Александрович

студент Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»¹.

¹Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.

²Адрес: 602254 г. Муром, Карачаровское шоссе, 2.

Аннотация: Одной из основных задач, которую необходимо решать при построении тренажного комплекса существующих радиолокационных систем, является формирование траектории движения воздушных объектов. Наиболее часто траектория задаётся оператором в виде набора опорных точек в трёхмерном пространстве. Для построения непрерывной траектории предлагается использовать кривые Безье, формирующие траекторию в виде прямолинейных участков и дуг окружностей. В работе рассмотрена информационно-измерительная система, позволяющая автоматически формировать траектории движения объектов. Эта система реализована на базе модульных измерительных приборов в программной среде LabView.

Ключевые слова: траектория движения, кривые Безье, модульные приборы, информационно-измерительная система, радиолокационные системы.

Введение

При тренировке операторов и контроле работоспособности радиолокационных систем (РЛС) автоматически назначаются и непрерывно формируются трассы движения воздушных объектов (ВО). При моделировании трасс движения ВО можно использовать два подхода: ручной ввод координат опорных точек, образующих очерчивающую траекторию движения в виде ломаной линии, с указанием скоростей полёта в этих точках, либо использовать набор заданных моделей в виде жёстко заданных форм траекторий на различных этапах полёта воздушного судна. От моделирующей системы требуется при последовательном накоплении массива информации об опорных точках, либо шаблонов движения, автоматически формировать уравнения движения ВО по трём про-

странственным координатам $x(t_p)$, $y(t_p)$, $z(t_p)$ и скорости $V(t)$, и выдачу этой информации в реальном масштабе времени. Построение траектории движения в виде отрезков прямых, соединяющих заданные точки при постоянной скорости движения ВО между соседними точками, является наиболее простым и интуитивно понятным способом формирования траектории. Однако при этом при переходе с одного отрезка траекторий на другой происходит резкое изменение курса и скорости ВО, что не соответствует реальному движению объекта. Кроме этого, подобная модель не позволяет формировать ускоренное движение ВО.

В связи с этим необходимо, чтобы процесс формирования траектории обеспечивал задание сложных вариантов воспроизведения траектории с гибкой, постепенной деформацией её

формы и кривизны. Траектория движения объекта должна образовываться только набором чередующихся круговых, параболических и прямолинейных сегментов. Движение вдоль каждого сегмента в общем случае должно быть равноускоренным либо равномерным [1, 2]. Оператор задаёт лишь значения мгновенных скоростей в каждой узловой точке опорной ломаной линии, которая интерпретируется как скорость в точке выхода объекта на переходную кривую. Информационно-измерительная система (ИИС) должна обеспечить точное аналитическое воспроизведение траектории в виде параметрической функции времени только для сегментов, состоящих из отрезков прямых и дуг окружностей [3–6].

Кроме отмеченных ограничений траектория движения ВО должна учитывать кинематику его маневра, когда объект (его пилот) испытывает мгновенное воздействие перегрузки вследствие скачка центростремительной силы

$$F_{ц} = mv^2/R,$$

где m и v – соответственно масса и скорость ВО. Перегрузки неизбежно возникают при переходе с траектории движения по прямой с радиусом кривизны $R \rightarrow \infty$ на траекторию движения с конечным радиусом $R_{окр}$.

Целью работы является разработка автоматизированной ИИС, обеспечивающей автоматическое формирование траектории движения ВО в реальном масштабе времени.

1. Математическая модель траектории

Для построения траектории движения ВО можно использовать способ описания кривой Безье. При этом параметрическое задание уравнений кривой по прямоугольным координатам формируется как функция безразмерного параметра $t \in [0; 1]$. Но способ [5] задает лишь геометрическую форму кривой и не обеспечивает физическое воспроизведение траектории движения ВО с учётом его кинематики – скоростей, ускорений, непосредственно привязанных к каждой точке всей траектории в заданные моменты времени. Кроме этого, безраз-

мерный параметр $t \in [0; 1]$ не привязан к реальному времени t_p движения по траектории.

Для построения модели движения ВО будем использовать метод сегментации траекторий на основе гладко совмещённых кривых различных степеней, построенных на общей опорной ломаной, которая задана группой из последовательно расположенных отрезков прямых. Для полученных кинематических параметров движения объекта по заданной траектории можно задавать и скоростной режим движения таким образом, чтобы определить текущую точку на трассе, в которой будет находиться объект в произвольный момент времени. С этой целью параллельно с траекторией будем задавать уравнения скорости $V(t_p)$ на основе её значений в узловых точках и соответствующих производных, представляющих ускорения. Для связывания между собой геометрии (кусочно-заданной кривой) и кинематики (профиль скорости) движения будем использовать объединяющий их параметр – пройденный путь S [7].

Исходной информацией для построения траектории движения являются предварительно заданные оператором опорные точки, а также мгновенные значения скорости в этих точках. В качестве траектории движения ВО будем формировать кусочно-заданную пространственную кривую, состоящую из плавно совмещаемых сегментов в виде параметрических кривых Безье первого-третьего порядков вида

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_i^n(t),$$

$$B_i^n = \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot t^i \times$$

$$\times (1-t)^{n-i}, \quad (1)$$

где n – степень кривой; i – порядковый номер опорной вершины; P_i – вектор координат i -й опорной точки; B_i^n – полином Бернштейна степени n ; t – безразмерный параметр, расположенный в интервале $t \in [0; 1]$.

Совокупность такого набора сегментов позволяет представить прямолинейные участки траектории, участки с ненулевой кривизной, участки с ненулевой кривизной и ненулевым

кручением – и таким образом описать различные виды маневра ВО.

Расположение общих точек стыка на отдельных сопрягаемых сегментах необходимо выбирать так, чтобы получить в основном гладкую пространственную траекторию, управляемую точками P_i . На рис. 1 показаны семь опорных точек $P_0(0; 0)$, $P_1(2; 2)$, $P_2(5; -0,5)$ и $C_0(5; -0,5)$, $C_1(8; -3)$, $C_2(11; -1)$ и $C_3(12; 1)$, соединённые отрезками прямых (штрих-пунктирная кривая). Сплошной линией на рис. 1 показана траектория, состоящая из сегментов в виде кривых Безье 2-й и 3-й степеней, формируемых в соответствии с (1).

Точки $P_2(5; -0,5)$ и $C_0(5; -0,5)$ сопрягаемых сегментов квадратной и кубической параболы имеют одинаковые координаты на плоскости. Для создания плавного перехода с одной кривой Безье на другую обеспечено плавное изменение радиуса кривизны. Это выполнимо, если первая и вторая производные сопрягаемых кривых непрерывны. Для обеспечения непрерывности первой производной достаточно, чтобы три соседние опорные точки двух кривых (P_1, P_2 и C_0, C_1) лежали на одной прямой, в этом случае при построении траектории две сопрягаемые кривые будут иметь общую касательную в точке стыка $C_0(5; -1)$. Для обеспечения непрерывности второй производной необходимо, чтобы пять смежных вершин двух кривых лежали на одной прямой или составляли выпуклый многоугольник. В представленном случае точки $P_2, P_3, C_0, C_1, C_2, C_3$ образуют выпуклый многоуголь-

ник. Выражения, описывающие кривые Безье второго и третьего порядка, по которым построена результирующая траектория на рис. 1, имеют вид:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= t^2 + 4t, & y_1(t) &= -4,5t^2 + 4t, \\ x_2(t) &= -2t^3 + 9t + 5, & \\ y_2(t) &= -4,5t^3 + 13,5t^2 - 7,5t - 0,5. \end{aligned} \quad (2)$$

2. Разработка ИИС моделирования траектории движения ВО

Автоматизировать процесс формирования траекторий движения ВО при помощи описанного метода при современном развитии программно-аппаратного обеспечения можно разными способами. Наиболее продуктивный основан на использовании современных модульных контрольно-измерительных комплексов. Одним из мировых лидеров в этой области является компания National Instruments, предлагающая модульную измерительную аппаратуру на базе шасси PXI в комплексе со средой разработки LabVIEW [8, 9]. Такой подход позволяет автоматизировать процесс моделирования траекторий движения ВО за счёт использования программных средств пакета LabVIEW, а

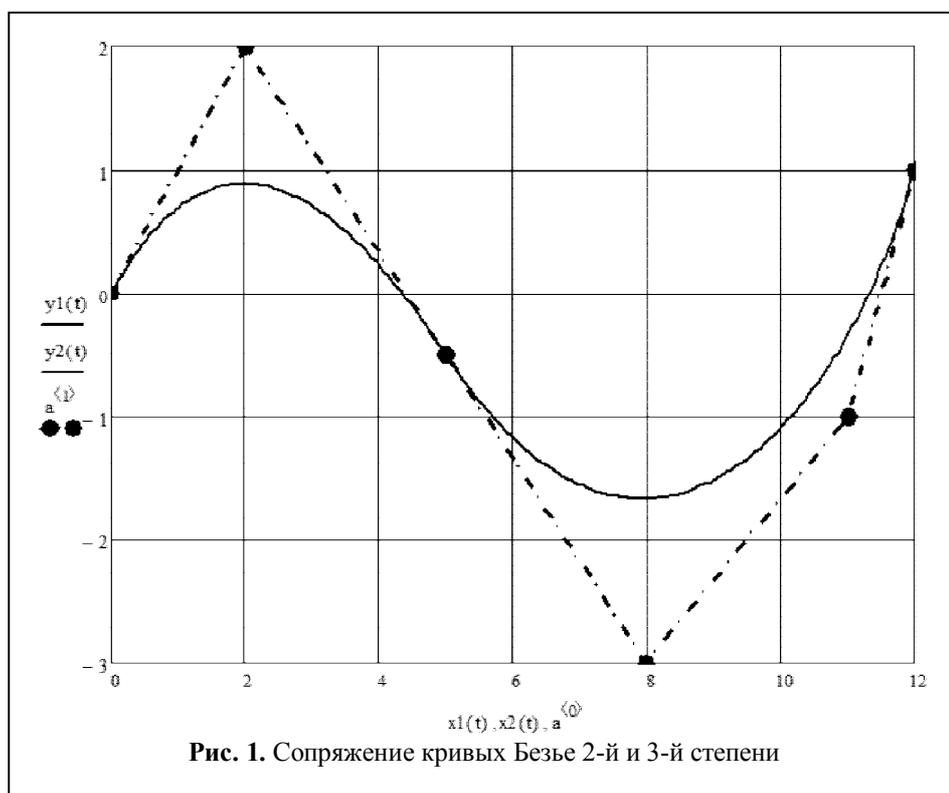


Рис. 1. Сопряжение кривых Безье 2-й и 3-й степени

также существенно ускорить процесс оценки работоспособности системы в целом. Использование модульного оборудования National Instruments позволяет создавать тестовые системы на основе гибкого аппаратного и масштабируемого программного обеспечения, сокращающего затраты на разработку и обслуживание системы.

В ИИС модульное оборудование National Instruments используется для генерации тестовых воздействий, оцифровки измеряемых сигналов и проведения необходимых измерений. Программная среда LabVIEW используется для создания удобного интерфейса, содержащего: модуль задания опорных точек; модуль построения траекторий; модуль выдачи координат траектории в реальном масштабе времени; модуль отображения результирующей траектории.

Общая структура системы имеет вид, представленный на рис. 2.

Разработанная ИИС расположена на шасси PXI и подключается к блоку формирования траекторной информации РЛС через аппаратный коммутатор. Для задания тестовых траекторий

движения ВО в зоне действия РЛС оператор может использовать готовые шаблоны траекторий, либо задать опорные точки для формирования новой траектории.

В модуле PXI выполняется формирование траектории движения воздушного объекта. Для этого в программной среде LabView реализованы несколько программных блоков (виртуальных приборов):

1. Блок задания траекторий движения служит для ввода в систему опорных точек траектории и значений скоростей движения ВО в них. При задании опорных точек система определяет область пространства, где оператор может поставить опорную точку, а также диапазон скоростей ВО в этой точке с учетом ограничений на кинематику движения объекта;
2. Блок вычисления траекторий формирует сегменты траектории при помощи кривых Безье (1);
3. Блок формирования траекторий склеивает траекторию из отдельных сегментов, формирует координаты траектории в масштабе времени РЛС;
4. Блок отображения траектории

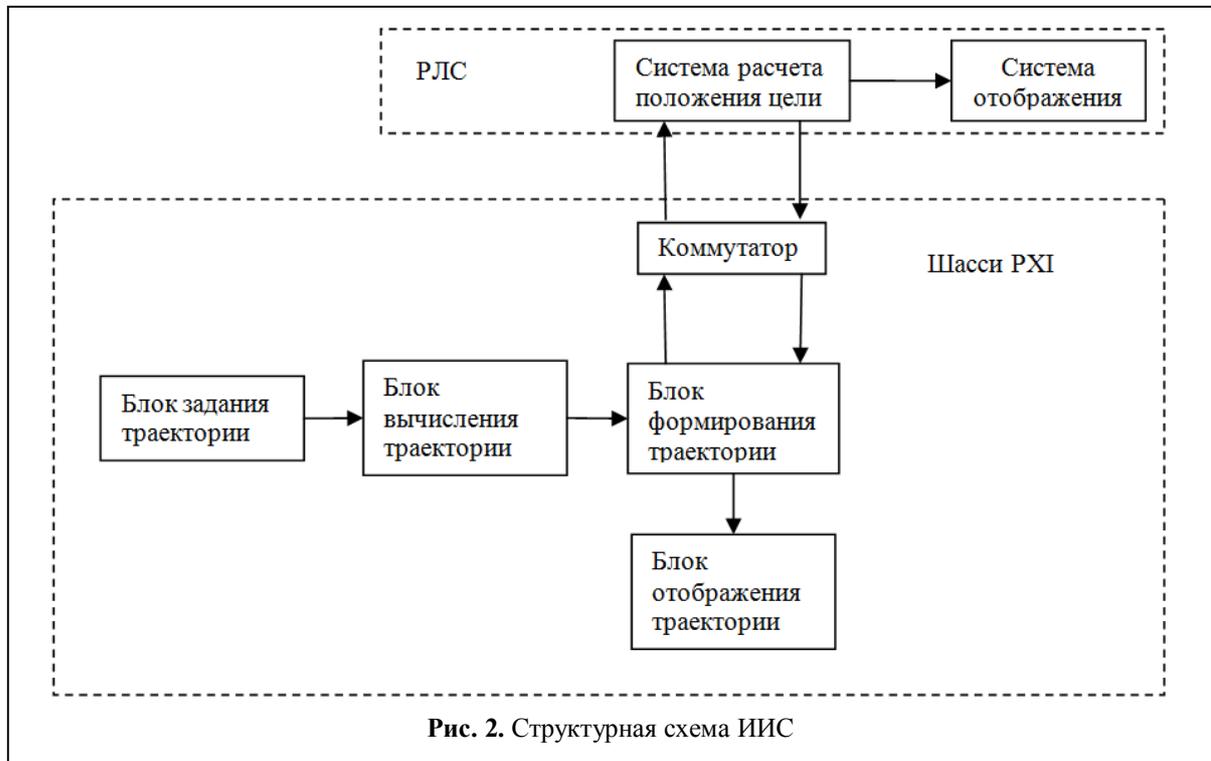


Рис. 2. Структурная схема ИИС

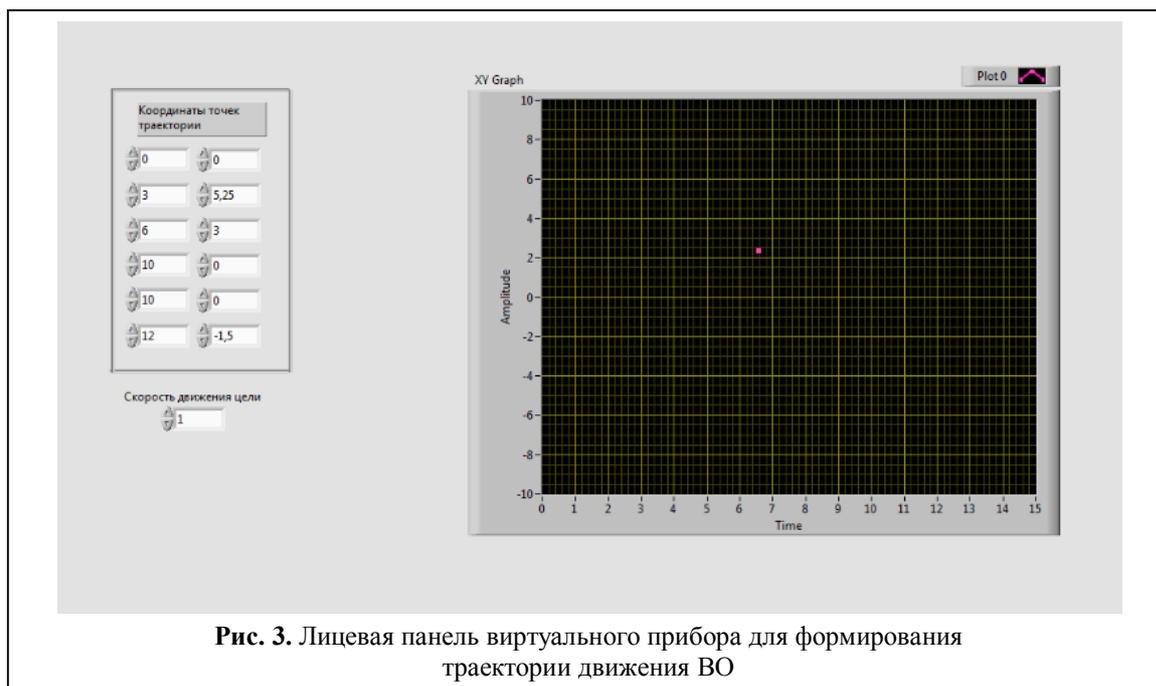


Рис. 3. Лицевая панель виртуального прибора для формирования траектории движения ВО

отображает результирующую траекторию движения на экране монитора ИИС.

5. Коммутатор осуществляет функцию сопряжения шасси РХИ с РЛС, принимает от неё сигналы синхронизации и передаёт на неё координаты траектории движения ВО.

В разработанной системе процесс задания траектории движения ВО частично автоматизирован. Пользователю предлагается выбрать количество участков, составляющих траекторию. Затем оператор выбирает порядок кривой, описывающей данный участок траектории, и вводит координаты опорных точек этого участка, по которым строится кривая Безье. После этого оператор выбирает порядок кривой, описывающей второй участок. При этом координаты первой опорной точки этого участка формируются автоматически, так как они соответствуют точке сопряжения двух кривых. При вводе координаты второй опорной точки, система устанавливает ограничения на значение координаты X , а значения координаты Y формируются автоматически исходя из условия, что она должна находиться на прямой, соединяющей две предыдущие точки. Третья точка вводится из условия, что пять

смежных точек лежат либо на одной прямой, либо образуют выпуклый многоугольник. Для этого система выводит на экран подсказку, сообщающую значения координат, больше/меньше которых не могут быть введены оператором.

Передняя панель виртуального прибора, выполняющего построение траектории, отображаемая на экране монитора, представлена на рис. 3.

Траектория движения ВО показана на рис. 4 в виде перемещения точек по экрану монитора.

Заключение

Разработана ИИС, позволяющая автоматически в реальном времени РЛС формировать траектории движения ВО с использованием кривых Безье с учётом ограничений на кинематику движения объектов. Опорные точки траектории задаются оператором в полуавтоматическом режиме. Система позволяет формировать до 100 траекторий движения ВО в зоне действия РЛС. Данная система позволяет упростить процесс моделирования траекторий, ускоряет процесс отладки и тестирования различных блоков РЛС.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-37-00077.

Литература

1. Квасов Б.И. Методы изометрической аппроксимации сплайнами. М.: ФИЗМАЛИТ, 2006. 360 с.

2. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение: пер. с англ. М.: Мир, 2001. 575 с.

3. Чекушкин В.В., Михеев К.В. Способ имитации траекторий движения объектов: пат. РФ. № 2617144; опубл. 21.04.2017.

4. Chekushkin V.V., Panteleev I.V., Mikheev K.V. Improving Polynomial Methods of Reconstruction of Functional Dependences in Information-Measuring Systems // Measurement Techniques. July 2015. Vol. 58, Is. 4. Pp. 385–392.

5. Данилин С.Н., Щаников С.А. Проблемы проектирования ИНСМ с заданной точностью функционирования // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2016. № 4. С. 3–11.

6. Galushkin A.I., Danilin S.N., Shchanikov S.A. The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems // Source of the Document 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. 2015. Pp. 1–6. (DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147034)

7. Чекушкин В.В., Жиганов С.Н., Быков А.А., Михеев К.В. Воспроизведение траекторий движения объектов в системах контроля воздушного пространства // Мехатроника, Автоматизация, Управ-

ление. 2018. № 2. Том 19. С. 126–133. DOI: 10.17587/mau.19.126-133.

8. Жиганов С.Н., Смирнов М.С., Романов Д.Н. Система контроля формируемых сигналов гетеродина РЛС // XIII международная научно-практическая конференция "Инженерные приложения на базе технологий NI – NIDays 2014": сб. тез. докл. Москва, 19–20 ноября 2014 г.

9. Жиганов С.Н., Смирнов М.С., Романов Д.Н. Исследование характеристик цифрового приемника радиолокационных сигналов на микросхеме 1288 ХК1Т // 17-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение», 25–27 марта 2015 г., Москва, Россия. С. 377–380.

Поступила 22 июня 2018 г.

English

DEVELOPMENT OF THE INFORMATION AND MEASURING SYSTEM SHAPING AIRBORNE OBJECT TRAVEL PATH

Dmitry Nikolayevich Romanov – Candidate of Technical Sciences; Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov"¹.

E-mail: radon81@mail.ru.

Mikheyev Kirill Valeryevich – Candidate of Technical Sciences; Engineer-Designer, JSC "Murom Plant of Radio Measuring Instruments"².

E-mail: kiri-mikheev@yandex.ru.

Vladislav Aleksandrovich Palmanov – Student, Radio Engineering Department, Murom Institute (Branch) "Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov"¹.

¹*Address:* 602264, Murom, Orlovskaya St., 23.

²*Address:* 602254, Murom, Karacharovskoye Sh., 2.

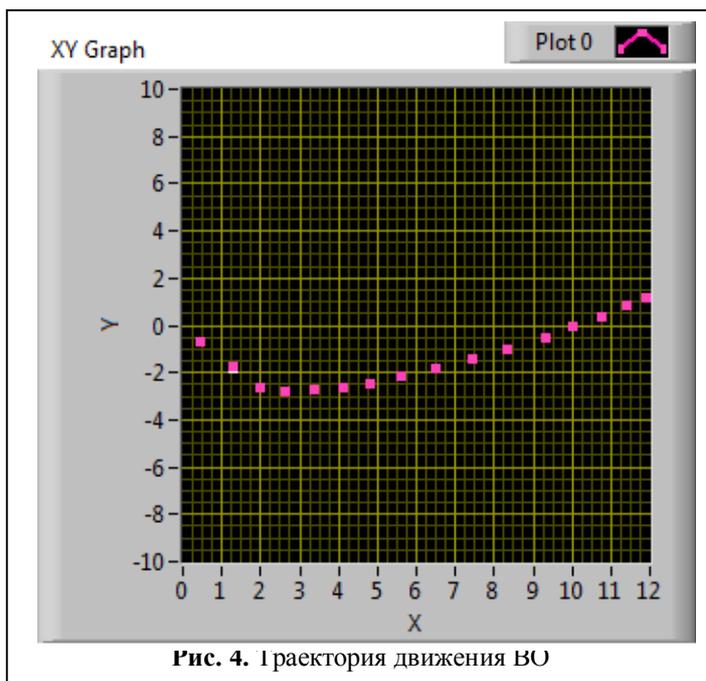


Рис. 4. Траектория движения ВО

Abstract: Airborne object traffic paths are automatically assigned and continuously formed when training operators and monitoring radar system performance. That said the operator enters coordinates of the reference points shaping the travel path in the form of the broken line with the indication of flight speeds in these points. The simulation system is required to shape automatically airborne object motion equations with respect to space coordinates and speed and provide this information to radar stations in real time when accumulating consecutively the data array on reference points. When constructing travel path, it is essential to set complex options of its replication with flexible, gradual deformation of its shape and curvature. The exact analytical path replication in the form of time parametric function for the segments comprising straight line segments and circle arches of circles is provided in the developed information and measuring system. Besides travel paths consider the object maneuver kinematics i.e. overloads in passing from straight line travel path into the travel path with a finite radius of curvature. The purpose of this paper is the development of the automated IMS (information and measuring system) ensuring automatic shaping of airborne object travel path in real time. To construct the airborne object travel path the description mode of Bezier curve was used. To construct the airborne object motion model there was used the travel path segmentation method based on the smoothly combined curves of varying degrees built on the common broken line which is specified by group of successively located straight line segments. The speed equations were assigned on the basis of its values in the anchor points and corresponding derivatives representing accelerations for the received kinematic parameters of the object motion in the preset travel path. To bind together the configurations (the piece-wise defined curve) and the motion kinematics (the speed profile) there was used their consolidating parameter – the covered distance. The automation process of the airborne object travel path generation is ensured by the up-to-date modular control and measuring systems of the National Instruments Company, offering the modular measuring equipment on the basis of PXI chassis in package with LabView development environment. The modular equipment was used for the test-pattern generation, measured signal digitization and for performing the required measurements in the developed system. LabVIEW program environment was used to develop the user-friendly interface comprising: setting reference point unit; creation travel path unit; unit of path coordinate display in real time; final path display unit.

Keywords: travel path, Bezier curves, modular instruments, information and measuring system.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-37-00077.

References

1. Kvasov B.I. Spline approximation isogeometric methods. M. : FIZMALIT, 2006. 360 p.
2. Kahaner D., Moler C., Nash S. Numerical methods and software: transl. from Engl. M. : Mir, 2001. 575 p.
3. Chekushkin V.V., Mikheyev K.V. Simulation method of object travel path : Pat. RU. No. 2617144. dt. 21.04.2017.
4. Chekushkin V.V., Pantelev I.V., Mikheev K.V. Improving Polynomial Methods of Reconstruction of Functional Dependences in Information – Measuring Systems. Measurement Techniques. July 2015. Vol. 58, Iss. 4. Pp. 385–392.
5. Danilin S.N., Shchanikov S.A. Design problems of artificial neural networks with a specified quality of functioning. Algorithms, methods and data processing system. 2016. No. 4. Pp. 3–11.
6. Galushkin A.I., Danilin S.N., Shchanikov S.A. The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems // Source of the Document. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2015 – Proceedings. 2015. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147034.
7. Chekushkin V.V., Zhiganov S.N., Bulls A.A., Mikheyev K.V. Object path travel replication in air traffic control systems. Mechatronics, Automation, Management. 2018. No. 2, Vol. 19, Pp. 126–133. DOI: 10.17587/mau.19.126-133.
8. Zhiganov S.N., Smirnov M.S., Romanov D.N. The control system of radar oscillator generated signals. The XIII international applied science conference "NI-based Engineering Applications NIDays – 2014": Collection of Abstracts. Moscow. November 19–20, 2014.
9. Zhiganov S.N., Smirnov M.S., Romanov D.N. Characteristics investigation of 1288 XK1T chip-based radar impulse digital receiver. The 17th the International conference "Digital Signal Processing and Its Application", Moscow, Russia. March 25–27, 2015. Pp. 377–380.