

СТАТЬИ

УДК 004.942

**МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО
СПУТНИКА ЗЕМЛИ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Алдохина В.Н., Куликов С.В., Королев В.О.

*ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны
Российской Федерации, Санкт-Петербург, e-mail: belvik@list.ru*

Прогнозирование движения ИСЗ (искусственный спутник Земли) позволяет оценить космическую обстановку в зонах действия средств наземного наблюдения в любое наперед заданное время, предъявлять требования к точности измерительных средств, достоверности результатов прогнозирования. В статье сформулирована постановка и приведен алгоритм решения задачи прогнозирования движения спутника в околоземном космическом пространстве. Представлена модель решения задачи прогнозирования движения ИСЗ в околоземном космическом пространстве, которая реализована в виде виртуального прибора в пакете программирования LabVIEW 15. Программный продукт создан для наглядного обучения специалистов в области контроля космического пространства. При реализации приняты допущения о невозмущенном движении спутника, о сферической форме поверхности Земли; считается, что ИСЗ попал в зону видимости станции наблюдения, если его угол места больше величины, характеризующей станцию. Приведен пример реализации для спутника с заданными параметрами движения и координатами станции наблюдения. В результате исполнения программы получены координаты спутника в заданные моменты времени, относительно станции наземного наблюдения, элементы орбиты, вектор состояния ИСЗ, время входа/выхода космического объекта в зону/из зоны действия станции. Для визуализации решаемой задачи реализован модуль построения в виде Земного шара, орбиты спутника в околоземном пространстве, его места нахождения на орбите, зоны действия станции наземного наблюдения потребителя. Проанализирована эффективность использования разработанной модели в образовательном процессе.

Ключевые слова: модель, виртуальный прибор, средство наземного наблюдения, прогнозирование движения, ИСЗ

MODEL OF THE SATELLITE MOTION PREDICTING IN NEAR-EARTH SPACE

Aldokhina V.N., Kulikov S.V., Korolev V.O.

*Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education Mozhaisky Military Space Academy,
Saint-Petersburg, e-mail: belvik@list.ru*

Predicting of the movement satellites makes it possible to assess the space situation in the areas of operation of ground-based surveillance equipment at any predetermined time, to impose requirements on the accuracy of the means, the reliability of forecasting. The article provides the formulation and provides an algorithm for solving the problem of predicting the movement of a satellite in near-earth space. A model for solving the problem of predicting the motion of an artificial satellite in near-earth space is presented, which is implemented as a virtual device in the LabVIEW 15 programming package. The purpose of modeling is to train space control specialists. During the implementation, assumptions were made about the unperturbed motion of the satellite, about the spherical shape of the Earth's surface, it is considered that the satellite is in the visibility zone of the observation station if its elevation angle is greater than the value characterizing the station. An example of implementation for a satellite with given parameters of movement and coordinates of the observation station is given. As a result of the execution of the program, the coordinates of the satellite were obtained at specified times, relative to the ground observation station, orbital elements, the state vector of the satellite, the time of entry / exit of the space object into the zone / from the station's coverage area. To visualize the problem being solved, a construction module has been implemented in the form of the Earth, the satellite's orbit in near-earth space, its location in orbit, the coverage area of the consumer's ground observation station. The effectiveness of using the developed model in the educational process is analyzed.

Keywords: model, virtual instrument, ground surveillance, motion prediction, artificial satellite

Прогнозирование невозмущенного движения является приближением решения более сложной задачи – задачи долгосрочного прогнозирования движения ИСЗ (искусственного спутника Земли), в которой учитываются возмущающие факторы. Прогнозирование движения ИСЗ позволяет оценить космическую обстановку в зонах действия средств наземного наблюдения в любое наперед заданное время, предъявлять требования к точности измерительных средств, достоверности результатов прогнозирования.

Изучение задачи прогнозирования вызывает у будущих специалистов контроля космического пространства определенные трудности, связанные с большим объемом вычислений, высокими требованиями к математической подготовке, пространственному воображению. Компьютерное моделирование сложных процессов, реализующее представление объектов, характеризующих свойства системы и динамику ее изменения со временем, является лучшим выходом в такой ситуации [1; 2].

В образовательном процессе метод наглядности был и остается одинаково актуальным для изучения гуманитарных и технических дисциплин. Применение данного метода позволяет максимально задействовать зрительный анализатор для запоминания и последующего воспроизведения учебной информации.

Образовательные стандарты третьего поколения предполагают не передачу обучающимся установленного объема теоретических знаний и практических навыков, а овладение профессиональными компетенциями, т.е. способностью комплексного применения усвоенных знаний, умений и навыков. В научной и методической литературе широко освещаются как положительные эффекты использования электронных образовательных ресурсов, так и проблемы, связанные с их внедрением в процесс обучения на различных уровнях образования [3; 4].

К основополагающим знаниям будущих специалистов в области контроля космического пространства относятся сведения о законах движения ИСЗ в околоземном космическом пространстве. Без них невозможна дальнейшая профессиональная деятельность и совершенствование уровня профессионального мастерства.

Современные средства вычислительной техники и программные продукты, которые используются в образовательном процессе, позволяют существенно расширить возможности наглядного метода, а именно, провести моделирование и визуализацию различных процессов.

Для решения учебной задачи прогнозирования можно сделать следующие допущения: движение ИСЗ по орбите является невозмущенным (движение ИСЗ происходит в соответствии с основными законами механики, возмущающие факторы не учитываются); поверхность Земли является сферой (следовательно, географические координаты совпадают с геодезическими), высота стояния станции наблюдения равна нулю; считается, что ИСЗ попал в зону видимости станции наблюдения, если его угол места больше величины, характеризующей станцию.

Постановка задачи

Постановка прямой задачи прогнозирования.

Пусть информационное средство C_1 с географическими координатами (φ_1, λ_1) получило следующие данные об ИСЗ: в момент наблюдения t_0 по московскому времени были определены топоцентрические сфе-

рические координаты спутника: азимут β_0 , угол места ϵ_0 и дальность D_0 , а также скорости изменения координат V_β, V_ϵ, V_D .

Требуется рассчитать координаты ИСЗ относительно наземного средства наблюдения потребителя C_2 с известными географическими координатами (φ_2, λ_2) для фиксированных моментов времени в будущем.

Цель исследования: построение виртуального прибора, позволяющего по заданным данным рассчитывать координаты положения и скоростей ИСЗ в любой наперед заданный момент времени, относительно наземного средства наблюдения потребителя, визуализация решения задачи, анализ эффективности разработанной модели в учебном процессе.

Исходными данными для решения данной задачи являются:

- время t_0 измерения координат ИСЗ, время начала расчета t_1 , интервал моделирования T ;
- географические координаты (долгота и широта) информационного средства $C_1(\varphi_1, \lambda_1)$ и средства наземного наблюдения потребителя $C_2(\varphi_2, \lambda_2)$;
- характеристики средства наземного наблюдения потребителя: минимальные и максимальные значения угла места, азимута и дальности действия потребителя;
- топоцентрические сферические координаты спутника: азимут β_0 , угол места ϵ_0 и дальность D_0 , а также скорости изменения координат V_β, V_ϵ, V_D .

Алгоритм решения задачи

Алгоритм решения задачи состоит из нескольких этапов [5; 6].

На предварительном этапе рассчитываются элементы орбиты невозмущенного движения ИСЗ (большая полуось a , эксцентриситет e , угол наклона орбит i , аргумент перигея ω , угол восходящего узла Ω , время прохождения ИСЗ через точку перигея), вектор состояния ИСЗ (x, y, z, V_x, V_y, V_z) в инерциальной системе координат. На этом же этапе проводится проверка корректности исходных данных.

В процессе моделирования для каждого момента времени $t_k \in [t_1, t_1 + T]$ выполняется следующая последовательность действий:

- 1) рассчитываются орбитальные координаты ИСЗ с помощью уравнения Кеплера;
- 2) выполняется пересчет орбитальных координат в топоцентрические координаты с центром в точке стояния средства наземного наблюдения потребителя;
- 3) определяется факт попадания ИСЗ в зону контроля средства потребителя C_2 .

Заключительный этап содержит вывод численных результатов, а также наглядную динамическую визуализацию процесса.

Выходными данными являются: элементы орбиты и вектор состояния ИСЗ, координаты и скорости изменения координат ИСЗ в прогнозируемые моменты времени в топоцентрической системе координат с центром в точке стояния средства потребителя C_2 , информация о попадании/непопадании ИСЗ в зону контроля средства C_2 , а также визуализированное изображение всего процесса.

Пример реализации алгоритма

Представляемая модель реализована в виде виртуального прибора в пакете программирования LabVIEW 15. Среда графического программирования LabVIEW позволяет с высокой степенью наглядности создавать виртуальные модели и отслеживать динамику процесса. Среда графического программирования LabVIEW находит применение в самых разнообразных сферах человеческой деятельности. Причинами столь широкого распространения пакета LabVIEW являются возможности не только проводить измерения, анализировать измеренные величины, отображать их на графиках и в отчетах, но и, используя программируемые логические контроллеры, осуществлять управление процессами. LabVIEW реализует концепцию графического про-

граммирования G, поэтому исходный код представляет собой блок-диаграмму, которая затем компилируется в машинный код. Поддержка выполнения кода, написанного на языке G, происходит в режиме потока данных, в то время как традиционные текстовые языки (например, C и C++) обеспечивают выполнение кода в виде последовательности команд.

На рис. 1 приведена лицевая панель виртуального прибора.

В левой ее части задаются исходные данные:

– координаты информационного средства $C_1(35^\circ, 140^\circ)$;

– координаты ИСЗ, полученные информационным средством в топоцентрической системе координат с центром в точке C_1 дальность $D_0 = 600 \text{ km}$, угол места $\varepsilon_0 = 30^\circ$, азимут $\beta_0 = 12^\circ$, скорости изменения координат

$V_d = 7 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, $V_\varepsilon = -0,5 \frac{0}{\text{s}}$, $V_\beta = 0,4 \frac{0}{\text{s}}$; время

наблюдения t_0 10.04.2020 16:35,02;

– координаты средства наземного наблюдения потребителя $C_2(50^\circ, 160^\circ)$ (по умолчанию зона действия средства строится по характеристикам дальности действия потребителя 20 тыс. км, значения угла места $\varepsilon \geq 10^\circ$);

– начальное время для расчета t_1 10.04.2020 16:35,32;

– время окончания расчета 11.04.2020 16:35,42.



Рис. 1. Лицевая панель модели прогнозирования

Правая часть отведена для вывода результатов. Заметим, что если данные задачи были введены некорректно, то появится всплывающее окно с надписью об ошибке. Найдены элементы орбиты

$$a = 15782.5 \text{ km}, e = 0.577, i = 62^\circ.196, \Omega = 19^\circ.339, \omega = 51^\circ.582,$$

$$t_{\text{пер}} = 10.04.2020 \text{ 16:36,11}$$

вектор состояния ИСЗ

$$\left(3665.72 \text{ km}, 3659.76 \text{ km}, 4246.69 \text{ km}, -7.7854 \frac{\text{km}}{\text{s}}, 0.4775 \frac{\text{km}}{\text{s}}, 5.7438 \frac{\text{km}}{\text{s}} \right)^T$$

в абсолютной геоцентрической системе координат.

Результаты прогнозирования выводятся в виде таблиц изменения координат и скоростей их изменения с заданным шагом. Для расчета времени прохождения спутника через зоны действия средства наземного наблюдения необходимо рассчитать координаты точек пересечения орбиты космического объекта и конуса зоны действия средства (рис. 2).

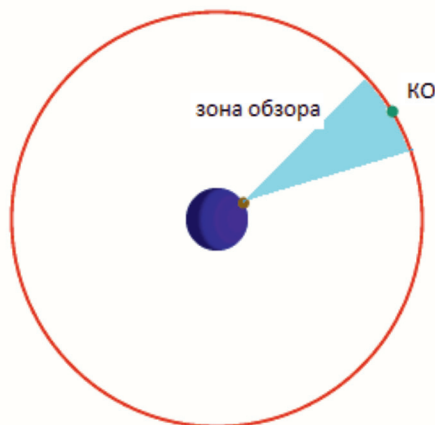


Рис. 2. Орбита ИСЗ и конус зоны действия наземного средства наблюдения

Время входа/выхода в зону действия средства и время пребывания в зоне вычисляется исходя из сравнения полученных результатов по координатам угла места, а именно, как видно из таблицы изменения угла места ИСЗ $\varepsilon = 10^\circ.3358 > 10^\circ$ на первом шаге вычислений (отсчет начинается с нулевого шага) и $\varepsilon = 7^\circ.3177 < 10^\circ$ на седьмом шаге, т.е. время пребывания в зоне составляет семь минут.

Для того чтобы принять окончательное решение о попадании ИСЗ в зону действия оптической станции, нужно учесть время наблюдения, положение Солнца. Эту часть

обучающимся предоставляется возможность сделать самостоятельно.

Для визуализации решаемой задачи (рис. 3) реализован модуль построения в виде Земного шара, орбиты ИСЗ в околоземном пространстве, места нахождения ИСЗ на орбите, зоны действия станции наземного наблюдения потребителя.

Для имитации работы станции наземного наблюдения потребителей информации используются конусообразные зоны действия с шаровым куполом, ограниченные по углу места. Положение ИСЗ на орбите отмечено красным цветом.

Ползунок слева от области построения позволяет увеличить/уменьшить масштаб построения. Двигая ползунок внизу картинки, можно увидеть передвижение ИСЗ по орбите на фоне вращения Земли вокруг своей оси, т.е. можно наблюдать картину входа – выхода ИСЗ в зону действия станции потребителя в динамике. Использование модели на учебных занятиях по изучению задачи прогнозирования позволяет получить глубокое понимание сути происходящих процессов.

Модель реализована в виде исполняемого файла *.exe. Однако если на компьютере не установлено LabVIEW или Run-Time Engine, файл с расширением .exe не стартует. Поэтому мы создали инсталлятор, куда включен Run-Time Engine и другие используемые компоненты.

Использование модели прогнозирования движения ИСЗ в учебном процессе обучения специалистов в области контроля космического пространства позволит углубить уровень понимания сути прогнозирования движения ИСЗ, и тем самым повысить качество усвоения учебного материала, поскольку даст возможность не выполнять громоздкие вычисления, а полностью сосредоточиться на анализе начальных данных и полученных результатов. Визуализация процесса развивает пространственное видение и делает обучение наглядным.

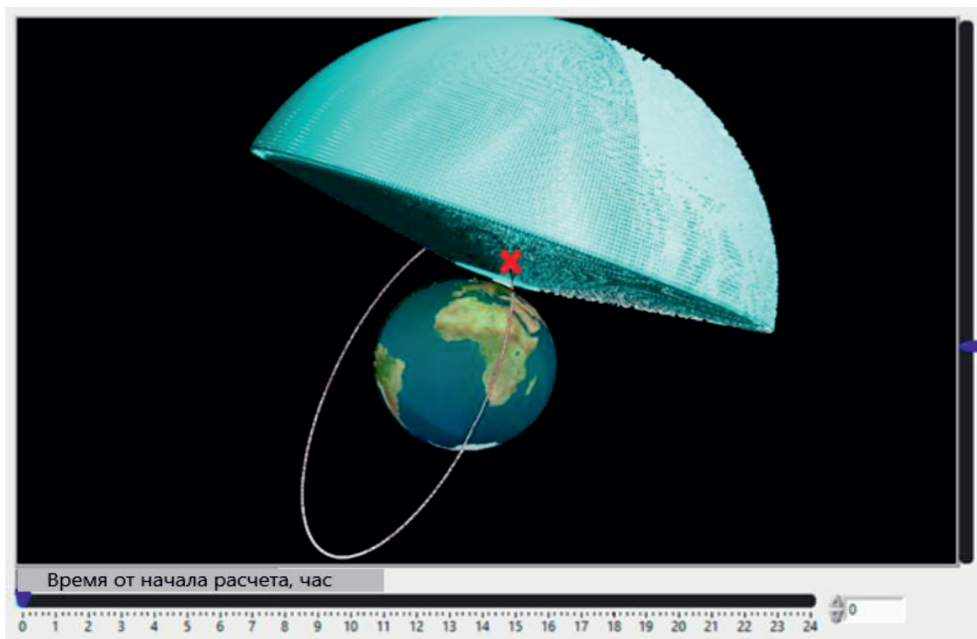


Рис. 3. Визуализация задачи прогнозирования движения ИСЗ

Разработанная модель была апробирована в образовательном процессе ВКА имени А.Ф. Можайского. Для определения ее эффективности были выбраны одна экспериментальная (ЭГ) и одна контрольная (КГ) группы, занятия в которых проводились без изменения тематического плана одним и тем же преподавателем. В ЭГ прогнозирование движения ИСЗ рассчитывалось и визуализировалось с помощью виртуального прибора, в КГ занятия проводились без его использования. Результаты текущего контроля показали, что в ЭГ процент положительных оценок был выше на 5%, а процент хороших и отличных оценок – на 15% выше, чем в КГ. После изучения материала было проведено анкетирование обучающихся в экспериментальной группе. Использование моделей, тренажеров способствует усвоению теоретического материала независимо от уровня подготовленности по дисциплине, что и отметили все опрошенные учащиеся.

Выводы

В данной статье описан разработанный авторами виртуальный прибор прогнозирования движения искусственного спутника Земли в околоземном космическом пространстве. Прибор состоит из двух блоков: вычислительного и блока построения. В вычислительном блоке рассчитывается положение ИСЗ на орбите в любой наперед заданный промежу-

ток времени, время входа/выхода в зону/из зоны действия станции наземного наблюдения. Блок построения позволяет визуализировать траекторию движения ИСЗ и границы действия станции наземного наблюдения. В работе проанализированы преимущества использования модели в образовательном процессе. Эффективность ее использования при обучении подтверждается результатами анкетирования и текущего контроля учащихся.

Список литературы

1. Алдохина В.Н., Куликов С.В., Лиференко В.Д., Чесноков Д.С. Виртуальный прибор для исследования формы траектории полета ИСЗ от значений элементов орбиты // Компоненты и технологии. 2017. № 2. С. 128–130.
2. Алдохина В.Н., Гудаев Р.А., Смирнов М.С., Шаймухаметов Ш.И. Модель системы мониторинга и контроля воздушно-космического пространства // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 668. С. 8–20.
3. Бойкова А.В. Использование информационных технологий в образовательном процессе военного вуза // Интернет-журнал «Мир науки». 2017. Т. 5. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <https://mir-nauki.com/PDF/96PDMN617.pdf> (дата обращения: 05.01.2021).
4. Васильева Н.В., Кунтурова Н.Б., Прокофьева А.Л. Образовательные средства информационно-коммуникационных технологий в учебном процессе военного вуза // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2018. № 661. С. 207–215.
5. Эскобал П. Методы определения орбит. М.: Мир, 1970. 472 с.
6. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов: учебник для вузов. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2016. 528 с.