

АКУЛИЧ С.В., КОЛЕСНЕВА И.П., ЖУК А.А.

## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Военная академия Республики Беларусь  
г. Минск, Республика Беларусь

В статье рассмотрено содержание этапов имитационного моделирования, которые предусматривают построение логико-математической модели исследуемой системы, разработку моделирующего алгоритма, описывающего процесс ее функционирования, разработку программы, реализующей этот алгоритм и проведение экспериментов с имитационной моделью. Приведено описание реализации принципов имитационного моделирования в системе поддержки принятия решений при организации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включающей имитационные модели космического аппарата и наземного объекта. Рассмотрены особенности реализации в моделирующем алгоритме случайного выбора режимов ДЗЗ космического аппарата, наземных объектов для дистанционного зондирования, имитации события «разрешение объекта».

**Ключевые слова:** моделирование, имитационная модель, моделирующий алгоритм, имитация случайного события, система поддержки принятия решений, дистанционное зондирование Земли

### Введение

Одним из наиболее распространенных методов моделирования сложных систем является использование имитационного моделирования.

Имитационная модель представляет собой компьютерную программу, которая отображает структуру и воспроизводит поведение реальной системы со временной динамикой [1].

Проведение исследований с использованием имитационного моделирования позволяет оценить эффективность исследуемой системы не просто с использованием аналитических моделей, но за счет воспроизведения поведения самой системы.

Этапами имитационного моделирования являются [2]:

- построение логико-математической модели исследуемой системы;
- разработка моделирующего алгоритма функционирования системы;
- программирование имитационной модели (ИМ);
- исследование системы с помощью ее ИМ.

### Содержание этапов имитационного моделирования

Логико-математическая модель системы представляет собой упрощенное математическое описание системы, построение которой осуществляется следующим образом:

- анализируется система, проводится ее декомпозиция для математического описания и установления связей между элементами;

- определяются параметры, переменные и пространство состояний, а также их диапазоны изменения;

- выбираются показатели эффективности;
- формируется динамическое описание системы, описывающее процесс взаимодействия ее элементов между собой и с внешней средой;
- проверяется адекватность логико-математической модели.

Моделирующий алгоритм описывает последовательность действий системы в ходе ее функционирования путем формирования ряда ее состояний (фазовая траектория) [2].

Описание моделирующего алгоритма начинается с выбора способа имитации системы (способа формирования фазовой траектории). В качестве способов имитации системы выделяют следующие [3]:

*событийный* – фиксирование моментов наступления событий в системе;

*просмотр активностей* – анализ выполнения действий в системе, на осуществление которых требуются затраты времени;

*процессный* – выполнение всей хронологической последовательности событий и действий, называемой процессом.

Далее записываются математические соотношения, описывающие поведение элементов системы (формализация модели). При этом следует учитывать, что на функционирование системы, как правило, оказывают влияние различные случайные факторы.

Если логико-математическая модель системы включает случайные элементы и если нельзя

пренебречь стохастичностью системы, то результатом будет вероятностная модель; в противном случае – детерминированная.

Для разработки детерминированных моделей используется математический аппарат дифференциальных (или интегро-дифференциальных) уравнений, а для разработки вероятностных моделей – метод статистического моделирования (метод статистических испытаний или метод Монте-Карло) [4].

Моделируемая система функционирует во времени, т. е. необходимо с помощью механизма формирования модельного времени определить порядок изменения значений переменных, определяющих ее состояния (динамика изменения фазовой траектории).

Существуют два метода принципов изменения модельного времени [5, 6]:

«принцип  $\Delta t$ » – изменение модельного времени с фиксированным интервалом  $\Delta t$ ;

«принцип  $\Delta x$ » – изменение модельного времени при резких изменениях вектора состояний системы на некоторую величину  $\Delta x$ .

Эти изменения состояний системы происходят при наступлении так называемых «особых» событий, таких как поступление управляющих сигналов, внешних воздействий, выдача выходных сигналов и т. д.

Перед программированием модельного времени осуществляется представление моделирующего алгоритма в формуле-словесной или блок-схемной форме.

*Программирование ИМ* включает в себя следующее:

- выбор вычислительных и программных средств реализации ИМ;
- разработка программного интерфейса;
- написание программного кода моделирующего алгоритма на алгоритмическом языке;
- тестирование и отладка программы ИМ.

*Исследование системы с помощью ее ИМ* включает:

- планирование и проведение имитационных экспериментов;
- обработку и анализ результатов;
- получение выводов о поведении реальной системы;
- оценку адекватности ИМ.

Планирование имитационного эксперимента представляет собой процесс задания значений параметров системы, выбор которых определяется целью имитационного эксперимента.

Прогон ИМ – это имитационный эксперимент с ИМ системы, результатом которого является имитация ее фазовой траектории для заданных значений параметров системы, а также вычисление выбранных показателей эффективности.

Случайные значения показателей эффективности получают в результате одного прогона ИМ. Однако, по одному случайному значению показателя эффективности невозможно судить об эффективности функционирования системы, поэтому на данном этапе осуществляется несколько прогонов, в результате которых получается случайная выборка значений показателя эффективности.

### Описание имитационных моделей в системе поддержки принятия решений при организации дистанционного зондирования Земли

Рассмотрим особенности реализации принципов имитационного моделирования в разработанной системе поддержки принятия решений (СППР) при организации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [7].

Составляющими СППР, которые реализуют имитацию процесса ДЗЗ являются имитационные модели космического аппарата (КА) и наземного объекта.

В СППР для имитации процессов ДЗЗ формирование модельного времени осуществляется по «принципу  $\Delta t$ », то есть изменение значений модельного времени осуществляется с постоянным шагом. Шаг изменения модельного времени задается оператором СППР в модуле формирования исходных данных.

При проведении имитационного эксперимента осуществляется несколько прогонов СППР. Прогон предусматривает реализацию моделей КА, наземного объекта и расчета показателей достоверного разрешения объекта на каждый момент модельного времени. Прогон завершается по достижении модельным временем значения установленного интервала прогнозирования.

По окончании прогона осуществляется расчет математического ожидания числа разрешенных объектов с помощью следующего соотношения:

$$M_{\text{разр.}} = \sum_{i=1}^{NZ} \frac{K_{\text{разр.}i}}{K_{\text{попад.}i}},$$

где  $NZ$  – количество объектов, каждый из которых хотя бы один раз попал в зону ДЗЗ КА;

$K_{\text{разр.}i}$  – суммарное количество наступлений события «разрешение  $i$ -го объекта»;

$K_{\text{попад.}i}$  – суммарное количество попаданий  $i$ -го объекта в зону ДЗЗ.

Значение математического ожидания числа разрешенных объектов используется в качестве интегрального показателя эффективности процесса ДЗЗ.

Функционирование данной СППР основано на процессном способе имитации, заключающемся в просмотре активности ИМ КА и регистрации

событий, происходящих в ИМ наземного объекта. Под активностью модели КА понимаются действия, связанные с имитацией движения КА и формированием их зон ДЗЗ.

Активность модели КА приводит к наступлению следующих событий в модели наземного объекта: попадание наземного объекта в зону ДЗЗ, выход объекта из зоны ДЗЗ.

В ИМ наземного объекта фиксируются моменты времени наступления этих событий, рассчитываются время пребывания объекта в зонах ДЗЗ и кратность попадания в них, осуществляется отображение на электронной карте местности (ЭКМ) значка наземного объекта, маршрута передвижения мобильного объекта. В связи с отсутствием необходимости имитации случайных событий ИМ наземного объекта является детерминированной.

В ИМ КА для текущего значения модельного времени осуществляется расчет прямоугольных координат подспутниковой точки, отображение ее на ЭКМ, расчет прямоугольных координат границ зоны ДЗЗ, отображение зоны на ЭКМ, отображение значений показателей попадания наземных объектов в зоны ДЗЗ для каждого КА.

ИМ КА является вероятностной, т.к. в ней осуществляется случайный выбор режима и типа ДЗЗ, наземных объектов для дистанционного зондирования, имитация события «разрешение объекта».

Рассмотрим особенности имитации этих событий в моделирующем алгоритме рассматриваемой СППР.

### Имитация выбора режима и типа ДЗЗ

Для имитации выбора режима и типа ДЗЗ осуществляется розыгрыш двух дискретных случайных величин (ДСВ): «номер режима ДЗЗ» и «номер типа ДЗЗ», каждая из которых может принять значение из множества {1; 2; 3}. Словесное описание режимов, соответствующих значениям этих ДСВ представлено в таблице 1.

Таблица 1. Описание значений ДСВ

Номер ДСВ	Название ДСВ	Значения ДСВ и их описание		
		1	2	3
1	номер режима ДЗЗ	режим 1	режим 2	режим 3
2	номер типа ДЗЗ	тип 1	тип 2	тип 3

Ряд распределения вероятностей этих ДСВ определяется оператором в модуле формирования исходных данных в виде таблицы 2.

В ИМ КА осуществляется контроль введенных значений: сумма значений вероятностей в каждой из строк таблицы 2 должна быть равна 1.

Таблица 2. Ряд распределения вероятностей ДСВ

Номер ДСВ	Значения ДСВ		
	1	2	3
1	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$
2	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$

Пример заполнения таблицы распределения вероятностей рассматриваемых ДСВ при равновероятном включении режимов ДЗЗ и преимущественном включении ДЗЗ типа 1 или типа 2 представлен в таблице 3.

Таблица 3. Пример распределения вероятностей ДСВ

Номер ДСВ	Значения ДСВ		
	1	2	3
1	0,34	0,33	0,33
2	0,4	0,4	0,2

Розыгрыш ДСВ осуществляется следующим образом. Розыгрывается значение базовой случайной величины  $\alpha$  [3, 5], которая имеет равномерное распределение на  $[0; 1)$ . Далее значение искомой дискретной случайной величины  $R_i$  рассчитывается в соответствии со следующим выражением:

$$R_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha < P_{i1} \\ 2, & \text{если } P_{i1} \leq \alpha < P_{i1} + P_{i2} \\ 3, & \text{если } P_{i1} + P_{i2} \leq \alpha < P_{i1} + P_{i2} + P_{i3} \end{cases}, \quad i \in \{1; 2\},$$

где  $i$  – номер ДСВ.

Например, для последней строки таблицы 3 данное выражение будет выглядеть следующим образом:

$$R_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha < 0,4 \\ 2, & \text{если } 0,4 \leq \alpha < 0,8 \\ 3, & \text{если } 0,8 \leq \alpha < 1 \end{cases}.$$

### Имитация выбора наземного объекта для режима 3 ДЗЗ и события «разрешение объекта»

Выбор объекта для режима 3 ДЗЗ осуществляется с учетом важности объекта. На этапе формирования множества наземных объектов ЛППР задает значение коэффициента важности для каждого объекта.

Предположим, что выбор любого из  $N$  объектов, находящихся в пределах доступности зоны режима 3 ДЗЗ, является достоверным событием. Обозначим вероятность противоположного ему события  $P_{\text{выб.0}}$ . Таким образом,  $P_{\text{выб.0}} = 0$ .

Выполним нумерацию указанных объектов по порядку от 1 до  $N$ . Вероятность выбора  $i$ -го объекта для режима 3 ДЗЗ ( $P_{\text{выб.}i}$ ) определим как долю значения его важности в общей важности этих объектов:

$$P_{\text{выб.}i} = \frac{K_{\text{важ.}i}}{\sum_i K_{\text{важ.}i}}, \quad i = \overline{1, N}, \quad K_{\text{важ.}i} \in (0; 1],$$

где  $K_{\text{важ.}i}$  – коэффициент важности  $i$ -го наземного объекта;  $N$  – количество объектов, находящихся в пределах доступности зоны режима 3 ДЗЗ.

Розыгрыш номера объекта, выбираемого для режима 3 осуществляется с использованием выражения логики предикатов:

$$\forall i \in [1; N-1]: \sum_{j=0}^i P_{\text{выб.}j} \leq \alpha < \sum_{j=0}^{i+1} P_{\text{выб.}j} \rightarrow N_D = i,$$

где  $N_D$  – номер объекта, выбранного для режима 3 ДЗЗ.

Розыгрыш события «разрешение объекта» осуществляется следующим образом: если  $\alpha < P_{\text{разр.}i,j}$ , то событие произошло, иначе – не произошло ( $P_{\text{разр.}i,j}$  – вероятность разрешения  $i$ -го объекта бортовым оборудованием  $j$ -го КА).

Событие «разрешение объекта» разыгрывается при наступлении события «выход объекта из зоны ДЗЗ».

## Заключение

Имитационное моделирование является одним из методов анализа сложных систем, которое позволяет строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. Реализация изменения модельного времени как может осуществляться с постоянным шагом («принцип  $\Delta t$ ») так и переменным («принцип  $\Delta x$ »).

Использование «принципа  $\Delta t$ » в имитационных моделях СППР, рассмотренной в статье позволяет проводить имитационный эксперимент в графическом режиме с отображением на ЭКМ наземных объектов, подспутниковых точек КА и зон ДЗЗ. Это дает возможность создания различных ситуаций зондирования Земли на заданные моменты времени и визуального контроля моделируемых событий.

В связи с отсутствием достоверной информации о режимах работы КА в моделирующем алгоритме ИМ КА реализован вероятностный характер имитации различных событий с использованием метода статистических испытаний. Это позволило повысить адекватность этой модели в частности и СППР в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Эльберг, М.С. Имитационное моделирование: учеб. пособие / М.С. Эльберг, Н.С. Цыганков. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 128 с.
2. Акопов, А.С. Имитационное моделирование : учебник и практикум для академического бакалавриата / А.С. Акопов – М.: Юрайт, 2017. – 389 с.
3. Харин, Ю.С. Математические и компьютерные основы статистического моделирования и анализа данных : учеб. пособие / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин [и др.] – Минск : Белорус. гос. ун-т, 2008. – 455 с.
4. Некрасов, К.А. Метод Монте-Карло на графических процессорах: учеб. пособие / К.А. Некрасов, С.И. Поташников, А.С. Боярченков, А.Я. Купряжкин. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2016. – 60 с.
5. Дигрис, А.В. Дискретно-событийное моделирование [Электронный ресурс] : курс лекций / А.В. Дигрис. – Минск : БГУ, 2011. – Режим доступа: <http://elib.bsu.by>, ограниченный.
6. Шевченко, А.А. Управление временем при проектировании имитационных моделей / А.А. Шевченко // Прикладная информатика. – 2006. – № 3. – С. 113–119.
7. Колеснева (Акулич), И.П. Поддержка принятия решений при организации противодействия средствам радиолокационной разведки космического базирования : дис. ... канд. техн. наук : 20.02.12 / И.П. Колеснева (Акулич). – Минск, 2017. – 183 л.

## REFERENCES

1. Elberg M.S., Cygankov N.S. Simulation modeling: textbook. Krasnoyarsk: Sib. federal univ., 2017. 128 p.
2. Akopov A.S. Simulation modeling: textbook and workshop for academic undergraduates. M.: Yurayt, 2017. 389 p.
3. Kharin, Yu.S. [et al.] Mathematical and computer foundations of statistical modeling and data analysis: textbook. Minsk: Belarus. state univ., 2008. 455 p.
4. Nekrasov K.A., Potashnikov S.I., Boyarchenkov A.S., Kupryazhkin A.Ya. Monte Carlo method on graphic processors: textbook. Ekaterinburg: Ural. univ., 2016. 60 p.
5. Digris, A.V. Discrete-event modeling [Electronic resource]: course of lectures. Minsk: BSU, 2011. Access mode: <http://elib.bsu.by>, limited.
6. Shevchenko A.A. Time management in the design of simulation models. Applied informatics, 2006. No. 3. Pp. 113-119.
7. Kolesneva (Akulich), I.P. Support for decision-making in organizing counteraction to space-based radar reconnaissance systems: dissertation for the degree of Ph.D. in technical sciences: 02.20.12. Minsk, 2017. 183.



## THE BASIC STAGES OF IMITATING MODELLING AND THEIR REALIZATION IN THE DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM

*Military Academy of the Republic of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus*

*The stages of imitating modeling are described in the article. The stages detail the following: construction of logical-mathematical model of investigated system, working out of the modeling algorithm that describes process of its functioning, working out of the program that realizes the algorithm, carrying out of experiments with imitating model. The authors suggest the description of the realization of the imitating modeling principles of in the decision-making support system of the organization of the remote sounding of the Earth. The features of the realization of the models of the casual choice of the modes of the remote sounding of the Earth, space vehicle, land objects are considered in the article.*

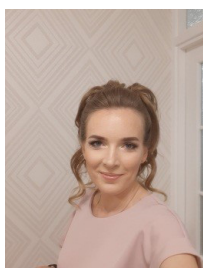
**Keywords:** modeling; imitating model; modeling algorithm; imitation of casual event; decision-making support system; remote sounding of the Earth



**Акулич Сергей Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент, область научных интересов – системный анализ, теория вероятностей, прикладная математика, теория принятия решений, математическое моделирование.

**Akulich S.V.**, PhD, associate professor, professor of the Department of Information and computing systems, Military Academy of the Republic of Belarus.

**E-mail:** serge\_asv@mail.ru



**Колеснева Инна Петровна**, кандидат технических наук, доцент, область научных интересов – системный анализ, методы математического программирования, обоснование и оптимизация управленческих решений, разработка систем поддержки принятия решений.

**Kolesneva I.P.**, PhD, associate professor, deputy head of the Department of Information and computing systems, Military Academy of the Republic of Belarus.

**E-mail:** inn2119@rambler.ru



**Жук Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, область научных интересов – системный анализ, методы математического программирования, методы и алгоритмы нейросетевой технологии обработки информации.

**Zhuk A.A.**, PhD, associate professor, head of the Department of Information and computing systems, Military Academy of the Republic of Belarus.

**E-mail:** k210@tut.by