

УДК: 004.942

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.П. Богомолов, М.Д. Гулиев, Д.А. Синяткин (Воронеж)

Опыт последних лет демонстрирует несомненное возрастание роли космической разведки при подготовке и в ходе проведения военных действий. Космические разведывательные системы используются независимо от геологического строения и рельефа местности, а также погодных условий, для слежения за повседневной деятельностью и районами сосредоточения вооруженных сил потенциального противника, районами военных конфликтов, выявления и уточнения характеристик объектов критической инфраструктуры, наблюдения за их состоянием и особенностями функционирования, вскрытия фактов использования радиоэлектронных средств и выявления по ним местоположения войск и сил. В связи с этим актуальной является задача определения возможностей орбитальной группировки разведывательных космических аппаратов (КА) по вскрытию стационарных и мобильных объектов на земной поверхности, а также передачи полученных разведывательных данных на наземные пункты приема и обработки информации для последующего анализа. Для решения вышеуказанной задачи была разработана имитационная модель функционирования орбитальной группировки разведывательных КА, которая позволяет производить:

- расчет траектории и движение космических аппаратов на различных орбитах и высотах полета, как в режиме реального времени, так и задавая временные периоды (для прогнозирования возможностей группировок в необходимые моменты времени);
- оценку пределов разведдоступности земной поверхности с учетом позиции спутников на орбите, диаграммы направленности антенной системы, характеристик приемно-передающей аппаратуры КА;
- расчет вероятности вскрытия наземных объектов с учетом их пространственного расположения, погодных условий и используемого состава космической группировки;
- анализ и оценку возможностей КА по передаче полученных разведывательных данных через геостационарные системы межспутниковой ретрансляции данных на наземные пункты приема и обработки информации.

Так как разработка данной имитационной модели требовала преодоления ряда трудоемких и сложных задач, требующих детальной проработки механизмов функционирования и алгоритмов работы всех ключевых узлов и систем, было принято решение о целесообразности декомпозиции сложных задач в последовательность более простых подзадач с использованием агентного подхода к моделированию организационно-технических систем. В соответствии с этим, в модели использованы разработанные ранее частные подзадачи [1 - 3], выполненных в виде отдельных моделей (составных частей для разработанной и описанной в данной статье имитационной модели).

На рисунке 1 представлен интерфейс разработанной имитационной модели функционирования орбитальной группировки разведывательных космических аппаратов, построенной в среде имитационного моделирования AnyLogic. Он включает в себя две основные области: рабочее поле и панель управления моделированием. Рабочее поле предназначено для визуализации процесса моделирования и анализа рассматриваемой обстановки. В качестве фона используется растровое изображение

карты с нанесенной поверх нее координатной сеткой. Наряду с обычными растровыми изображениями карт в разработанной модели реализована возможность работы с географической информационной системой (ГИС), применяя при этом встроенные возможности среды имитационного моделирования AnyLogic [1]. Основной причиной использования ГИС в модели является удобство и простота в работе с масштабом карты, координатами исследуемых объектов и точек зон покрытия (отпадает необходимость пересчета в различные системы координат, что положительно влияет на быстродействие работы модели).

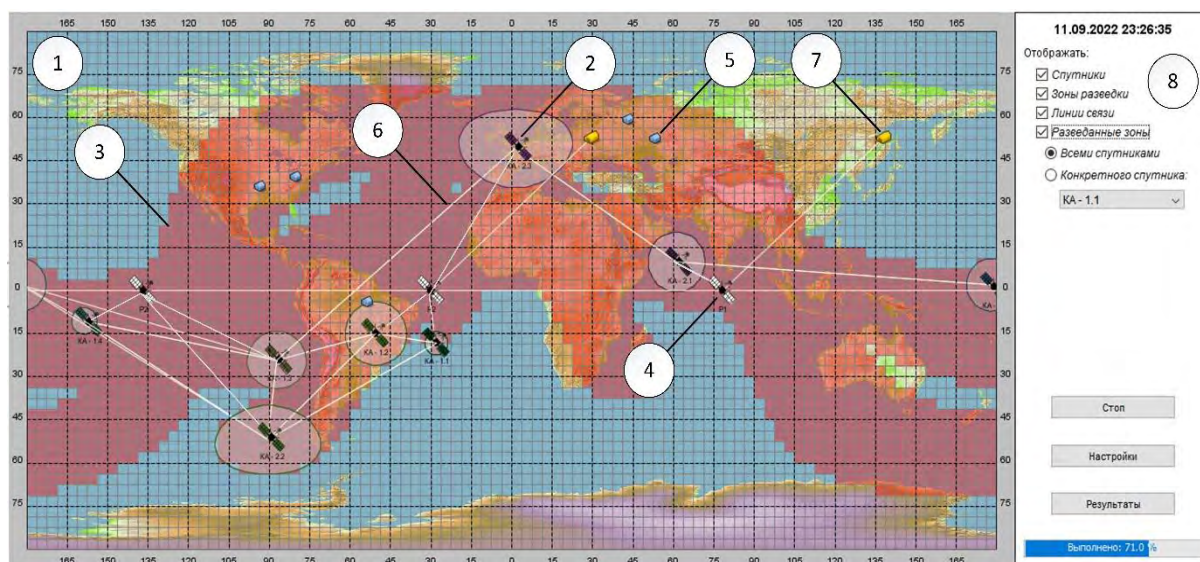


Рис. 1 – Интерфейс разработанной имитационной модели

1 – рабочее поле; 2 – разведывательный КА; 3 – разведанная зона; 4 – межспутниковый ретранслятор; 5 – объект разведки; 6 – линия связи; 7 – пункт приема и обработки информации 8 – панель управления моделированием

В процессе моделирования на рабочем поле отображается анимация движения разведывательных космических аппаратов, цель которых состоит в добывание разведывательных данных о наземных объектах с использованием бортовой аппаратуры видовой радиолокационной и оптико-электронной разведки. Все полученные в процессе разведки данные передаются на наземные пункты приема и обработки информации через геостационарные системы межспутниковой ретрансляции данных. Кроме того, на рабочем поле отображаются общая разведанная зона, а также линии связи между исследуемыми объектами, построение которых происходит с учетом пространственного расположения объектов относительно друг друга.

Имитационная модель позволяет производить анализ выполнения совместной работы группировки КА, геостационарных систем межспутниковой ретрансляции данных, а также наземных пунктов, поэтому для хранения больших массивов исходных данных в общей базе данных (БД) используются две электронные таблицы Excel:

1. «Космические аппараты» (вариант заполнения таблицы представлен на рисунке 2).

№	Название	Тип	Принадлежность	Дата / время	a	e	i	$\Omega$	$\omega$	M0
1	КА - 1.1	РЛР	Группировка - 1	31.12.2015 17:08	12000	0,5	45	110	0	30
2	КА - 1.2	РЛР	Группировка - 1	01.10.2015 0:00	10000	0,75	170	25	170	310
3	КА - 1.3	РЛР	Группировка - 1	02.10.2015 3:00	10000	0,1	0	13	32	90
4	КА - 1.4	РЛР	Группировка - 1	03.10.2015 6:00	13000	0,3	80	120	220	240
5	КА - 2.1	ОЭР	Группировка - 2	05.10.2015 12:00	14370	1	150	270	120	0
6	КА - 2.2	ОЭР	Группировка - 2	06.10.2015 15:00	13000	0	60	0	340	120
7	КА - 2.3	ОЭР	Группировка - 2	07.10.2015 18:00	13000	1	50	197	28	45
8	КА - 2.4	ОЭР	Группировка - 2	08.10.2015 21:00	15370	1	120	0	14	0
9	P-1	P	Ретранслятор	05.10.2015 12:00	35852	0	0	0	0	0
10	P-2	P	Ретранслятор	11.10.2015 15:00	35852	0	0	0	0	0
11	P-3	P	Ретранслятор	03.10.2015 6:00	35852	0	0	0	0	0

Рис. 2 – Вариант заполнения электронной таблицы Excel «Космические аппараты»

В электронной таблице Excel «Космические аппараты» содержится информация о всех искусственных спутниках Земли (ИСЗ) используемых в модели (КА разведки, КА – ретрансляторы). Кроме общей информации о космических аппаратах (название, тип, принадлежность) в таблице приведены традиционно используемые параметры Кеплеровой орбиты и моменты времени, необходимые для построения траектории полета (обозначения используемых параметров, а также единицы измерения приведены в таблице 1).

Таблица 1 – Параметры орбиты и моменты времени, необходимые для построения траектории полета космического аппарата

№ п/п	Параметр	Описание	Единицы измерения
1	$t_0$	начальный момент времени	с
2	a	большая полуось орбиты	м
3	e	эксцентриситет орбиты	
4	i	угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора	град
5	$\Omega$	долгота восходящего узла	град
6	$\omega$	аргумент перигея	град
7	M0	начальное значение средней аномалии	град

Благодаря использованию параметров из таблицы 1, в частности параметра  $t_0$ , имеется возможность пересчета местоположения КА на орбите в необходимые моменты времени, что позволяет строить траекторию движения и наблюдать за спутниками в режиме реального времени.

2. «Наземные объекты» (вариант заполнения таблицы представлен на рисунке 3).

№	Название	Тип	Долгота		Широта	
1	Объект - 1	О	92,3	з.д.	35,5	с.ш.
2	Объект - 2	О	80,1	з.д.	41,2	с.ш.
3	Объект - 3	О	55	з.д.	5	ю.ш.
4	Объект - 4	О	44,2	в.д.	58,5	с.ш.
5	Объект - 5	О	53,5	в.д.	52,6	с.ш.
6	Пункт - 1	П	30	в.д.	53,6	с.ш.
7	Пункт - 2	П	136	в.д.	53,6	с.ш.

Рис. 3 – Вариант заполнения электронной таблицы Excel «Наземные объекты»



В электронной таблице Excel «Наземные объекты» содержится информация о всех наземных объектах, используемых в модели (объекты разведки, пункты приема и обработки информации). К основным параметрам можно отнести долготу и широту местоположения объектов, благодаря которым имеется возможность моделировать с высокой точностью реальную обстановку на поверхности Земли.

В модели разработаны два нестандартных класса – космический аппарат и наземный объект (а также на их основе два типа агентов). Использование данных классов позволяет загружать информацию о всех объектах из электронных таблиц Excel в модель для работы с ними напрямую, без постоянного обмена данными с БД. Каждый разработанный тип агента в модели выполняет в процессе моделирования разный функционал в зависимости от входного параметра *type* (агент КА может работать и как разведывательный спутник и как ретранслятор данных, агент наземный объект – либо как объект разведки, либо как пункт приема и обработки информации). Основные параметры и функции агентов космический аппарат (kA) и наземный объект (g\_object) представлены ниже на рисунках 4 и 5 соответственно.



Рис. 4 – Основные параметры и функции агента космический аппарат

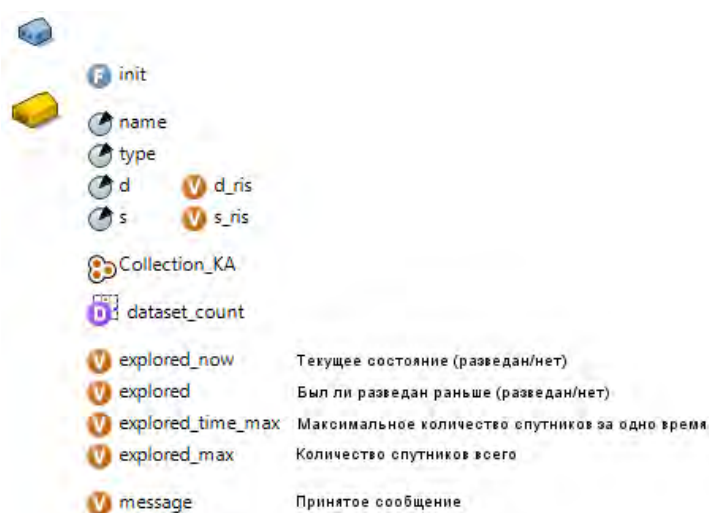


Рис. 5 – Основные параметры и функции агента наземный объект

Вторая основная область интерфейса модели – панель управления. Данная панель позволяет управлять процессом моделирования и настраивать отображение элементов на рабочей области. Основное же управление производится в окне настроек имитационной модели (рисунок 6), где есть возможность выбора режима работы,

используемых объектов для анализа, а также цели выполнения моделирования. Реализовано два режима работы – моделирование в режиме реального времени и в режиме выбора временного периода. При запуске моделирования в режиме реального времени изначально происходит пересчет местоположения спутников на момент времени указанный в поле «начало моделирования» (по умолчанию время запуска модели), затем симуляция продолжается в соответствии с выбранными настройками. Второй режим работы с выбором временного периода позволяет настраивать и отслеживать поведение объектов в интересующий период времени. При запуске модели в данном режиме работы также изначально происходит пересчет местоположения спутников на момент времени указанный в поле «начало моделирования» и продолжается до времени, указанного в поле «окончание моделирования».

Рис. 6 – Окно настроек имитационной модели

Как в первом, так и во втором режимах выполнения работы модели может быть прекращено вручную, а также автоматически, если задано и выполняется условие цели моделирования – вскрытие объекта с заданной вероятностью. Как только значение вероятности вскрытия будет равно или будет больше заданной, модель перейдет в режим паузы. При моделировании с целью расчета вероятности вскрытия объекта за промежуток времени автоматической остановки не последует, алгоритм будет действовать согласно настроек режима.

Под вероятностью вскрытия ( $P_{\text{вскр}}$ ) объекта одним КА за  $m$  пролетов будем считать вероятность хотя бы одного обнаружения объекта за время совершения пролетов [4], которая рассчитывается по формуле приведенной ниже

$$P_{\text{вскр}}(m) = 1 - e^{-Q_{\text{обн}} \times m},$$

где  $Q_{\text{обн}} = P_{\text{расп}} \times P_{\text{пог}} \times P_{\text{под}} \times P_{\text{маск}}$  – поисковая производительность КА;

$m$  – количество (интенсивность) пролетов;

$P_{\text{расп}}$  – вероятность распознавания объекта;

$P_{\text{пог}}$  – вероятность установления контакта с объектом с учетом погодных условий;

$P_{\text{под}}$  – вероятность распознавания в условиях противодействия;

$P_{\text{маск}}$  – вероятность установления контакта с учетом маскировки.

Для работы модели в соответствии с описанным выше функционалом был разработан и реализован алгоритм с использованием диаграммы состояний (рисунок 7).

После настроек модели и запуска моделирования происходит поочередный вызов функций согласно выбранному режиму работы. В общем случае процесс состоит из следующих этапов:

- движение космических аппаратов по орбитам;
- расчет зон покрытия земной поверхности;
- построение общей зоны разведки;
- расчет вероятности вскрытия наземных объектов;
- передача данных через ретрансляторы на пункты приема и обработки информации.

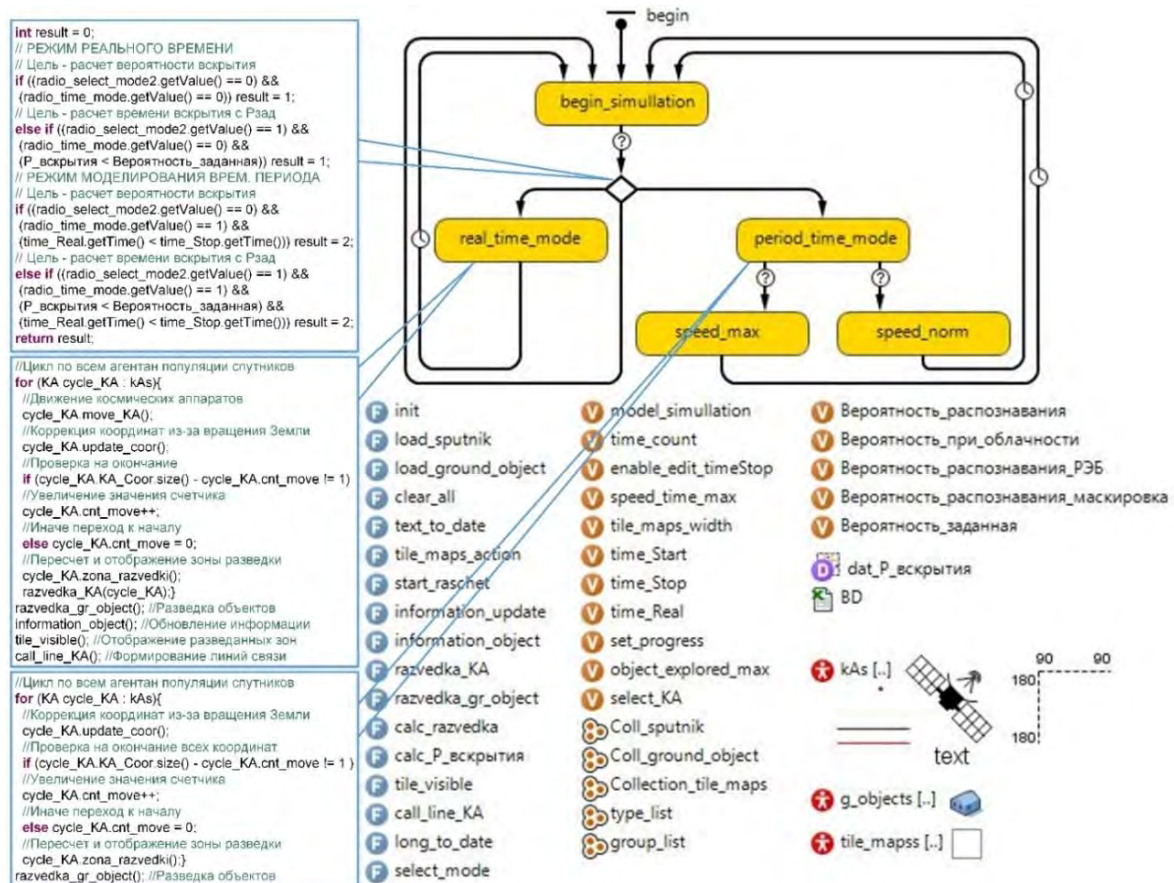


Рис. 7 – Алгоритм работы, необходимые переменные и функции

В процессе работы модели происходит формирование и отображение результатов моделирования (окно результатов моделирования представлено на рисунке 8), которые включают в себя отслеживание состояния выбранного наземного объекта разведки (ведется ли разведка в текущий момент времени и каким КА) и формирование зависимости вероятности вскрытия объекта от времени. Кроме того, в окне результатов отображается информация о количестве просмотров спутниками, максимальном количестве спутников в момент времени и о времени передачи данных на наземные пункты приема и обработки информации.



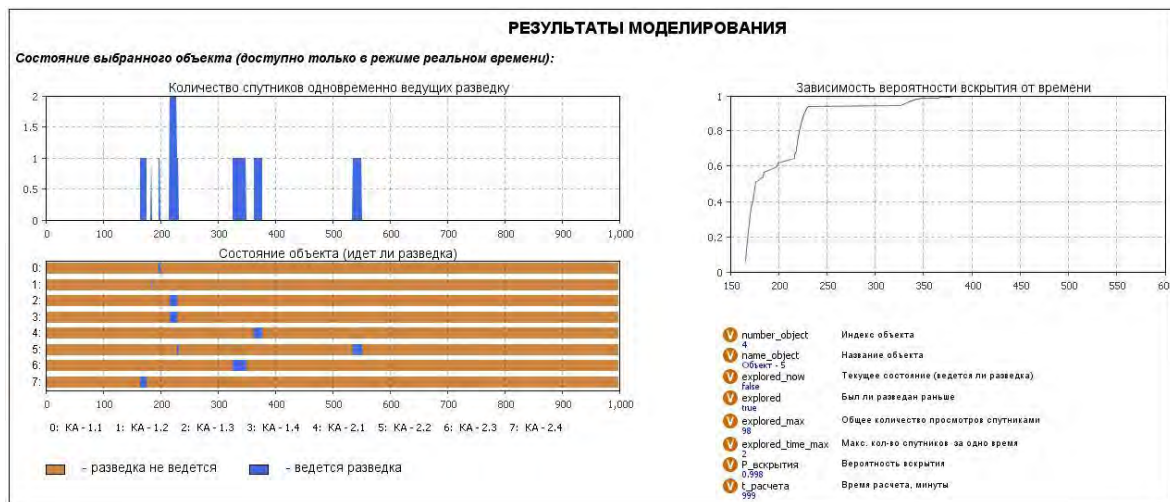


Рис. 8 – Окно результатов моделирования

Таким образом, описанная выше имитационная модель функционирования орбитальной группировки разведывательных космических аппаратов позволяет производить расчет траектории движения одиночного космического аппарата или группы спутников на различных орбитах, а также, совместно с методикой [1], производить расчет зоны покрытия земной поверхности разведывательными космическими аппаратами в реальном масштабе времени. Разработанная имитационная модель может быть использована для обоснования выбора позиций средств и комплексов радиоэлектронного подавления, относительно прикрываемых наземных объектов, для эффективного воздействия на объекты подавления, а также для решения других задач как военного, так и гражданского назначения.

### Литература

1. Богомолов А.П., Синяткин Д.А., Гулиев М.Д. Применение средств среды имитационного моделирования AnyLogic для расчета и формирования зон покрытия земной поверхности разведывательным космическим аппаратом // Труды Первой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в военной сфере «Имитационное моделирование систем военного назначения, действия войск и процессов их обеспечения» («ИМСВН – 2020») (Санкт-Петербург, 25 ноября 2020 г.) СПб: издательство ВО МТО – АО ЦТСС, 2020. 286с. ISBN 976-5-902241-47-8. С. 70-76.
2. Гулиев М.Д., Дворник А.В., Подрезов С.Н., Синяткин Д.А. Модель расчета зон покрытия земной поверхности космическим аппаратом с узконаправленной антенной системой. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611994 от 13.02.2020 г.
3. Гулиев М.Д., Богомолов А.П., Подрезов С.Н., Синяткин Д.А. Модель расчета границ зоны маскирования, создаваемой станцией активных помех космическим средствам радиолокационной разведки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612269 от 09.02.2022 г.
4. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов, М.: Советское радио, 1977, 336 с.