Климентьев К.Е. Мультиагентное моделирование процессов распространения и взаимодействия инфицирующих сущностей // Программные продукты и системы. — 2018. — № 1 (31). — С. 72-78.

УДК 004.94

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «ИНФИЦИРУЮЩИХ» СУЩНОСТЕЙ

К.Е. Климентьев, к.т.н., доцент
(*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королева*
Московское шоссе, 34,. г. Самара, 443086, Россия, climentieff@ro.ru)

==========

В статье рассматриваются основные подходы к мультиагентному моделированию процессов «инфицирования», характерных для технических сетей и живой природы. Примерами таких процессов являются развитие эпидемий болезнетворных микроорганизмов среди живых существ; распространение компьютерных вирусов и червей от компьютера к компьютеру; расширение лесных пожаров; передача информационных сообщений в технических и социальных сетях и т.п. Описана общая модель «вселенной». Анализируются графовые модели пространства, включая полный граф, безмасштабный граф, «геометрический» граф и различные «решетки». Рассматриваются различные модели переходов из состояние в состояние, среди которых SI, SIS, SIR, SEIR, SIDR и т.п. Обсуждаются различные способы сканирования целей, такие как последовательное сканирование, случайное сканирование, поиск по списку, «контратака» и др. Описывается способ настройки темпоральных характеристик отдельных агентов. Так же рассматривается архитектура системы моделирования, поддерживающей рассмотренные аспекты и их комбинации. Представлен пример конкретной программной реализации.

Ключевые слова*: компьютерные вирусы, сетевые черви, пожары, биологические инфекции, распространение, эпидемия, мультиагентное моделирование, имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование, сеть, случайный граф, граф Эрдеша-Реньи, безмасштабный граф, геометрический граф, решетка, SI, SIS, SIR, SEIR, SIDR, линейный поиск, случайный поиск, поиск по списку, система моделирования, программная реализация.*

Введение. На кафедре Информационных систем и технологий Самарского университета имени академика С.П.Королева продолжается разработка и реализация проблемно-ориентированной среды, предназначенной для имитационного моделирования процессов распространения и взаимодействия «инфицирующих» сущностей. «Инфицирующими» считаются сущности, экземпляры которых могут обладать неким свойством «инфицированности» и способны передавать это свойство другим экземплярам, не теряя его в результате передачи. Фактически, речь идет не о «передаче» свойства, а о «копировании» его из одного экземпляра в другой.

Примерами процессов и явлений реального мира, для которых характерно подобное поведение, являются развитие эпидемий болезнетворных микроорганизмов среди живых существ; распространение компьютерных вирусов и червей от компьютера к компьютеру; расширение лесных пожаров; передача информационных сообщений в технических и социальных сетях и т.п. Актуальность исследования подобных процессов и явлений средствами моделирования не вызывает сомнений.

1. Обзор предпосылок. Традиционно, для моделирования сложных процессов и явлений используются три основных подхода: натурный, аналитический и имитационный.

Очевидно, максимальной адекватностью и информативностью обладают натурные модели, которые, однако, далеко не всегда реализуемы на практике, в противном же случае часто требуют больших материальных затрат. Например, для натурного моделирования распространения компьютерных вирусов и червей требуется наличие специально сформированной тестовой сети, состоящей из большого количества компьютеров [5].

Аналитические модели «инфицирования» восходят к прототипам, разрабатываемым с конца XIX века для изучения эпидемий и эпизоотий среди людей и животных. В общем случае они описываются системами дифференциальных уравнений вида:

$$\left\{\begin{array}{l}\partial I/\partial T = F(I,S,R)\\ \partial S/\partial T = G(I,S,R)\\ \partial R/\partial T = H(I,S,R)\end{array}\right\},$$

где T – время; I – множество инфицированных, S – множество здоровых, R – множество «вылеченных» узлов; F, G и H – некоторые функции. Наиболее простые модели (например, с уравнениями Мальтуса и Фергюльста) решаются аналитически, однако уже модели типа Кермака-МакКендрика, не говоря уже о более сложных, - только численно. Для достижения приемлемой адекватности приходится чрезмерно усложнять модели - например, в работе [8] упоминаются аналитические модели биологических инфекций, включающие более тысячи дифференциальных уравнений. Чаще всего объектом изучения на аналитических моделях является асимптотическое поведение системы «инфицирующих» сущностей – т.е. на интервале времени, стремящемся к бесконечности, и в изотропной среде. При этом игнорируются, например, анизотропность среды, непостоянство условий во времени и т.п.

Таким образом, максимальной гибкостью и информативностью при приемлемом уровне материальных затрат обладают имитационные модели. Первые опыты по имитационному моделированию инфекций (и близких к ним процессов типа динамики популяций в игре «Жизнь» Конвея или распространения перколяционной волны в пористых средах) проводились в 1960-70-х годах и представляли собой простые реализации методов Монте-Карло, предусматривающие размножение и удаление абстрактных «фишек», расположенных в узлах «решеток». Подобные подходы использовались на протяжении нескольких десятилетий вплоть до последнего времени, например, см. работы [11, 13, 17, 18, 19]. Однако для увеличения адекватности имитационных моделей необходим учет большого количества разнородных и взаимодействующих друг с другом факторов, влияющих на протекание изучаемых процессов, что достижимо лишь при мультиагентном подходе. В этом случае вместо абстрактных «фишек» и «решеток» используются сколь угодно сложные и адекватные алгоритмические модели как отдельных экземпляров сущностей, так и среды их обитания. Разумеется, существуют универсальные инструментальные системы, предназначенные для мультиагентного моделирования любых процессов и явлений (например, AnyLogic [2]), но они, в силу своей невысокой проблемно-ориентированности требуют чересчур большого участия исследователя в описании и настройке проблемно-специфичных аспектов. Так же имеются системы для мультиагентного моделирования именно инфекций, но они подчас решают лишь узкие классы задач, например, только в области защиты информации [13, 18]; или только в области биологии и медицины [11]. Этими обстоятельствами и обусловлена актуальность проблемно-ориентированной среды, предназначенной для мультиагентного моделирования процессов распространения и взаимодействия «инфицирующих» сущностей.

Основными составляющими моделей, создаваемых средствами моделирующей среды являются: 1) модель «вселенной», в котором развиваются процессы и явления «инфицирования»; 2) и агентные модели экземпляров сущностей.

2. Модель «вселенной». Пусть «вселенная» $W=(W_1 \cup W_2 \cup \ldots)$ есть совокупность некоторого количества пересекающихся «миров» W_i, каждый из которых представим в виде $W_i=<G_i,Q_i>=<<V_i,X_i>,<A_i,M_i>>$. Здесь:

- $G_i=(V_i, X_i)$ – подграф, задающий «население» и «геометрию» i-го «мира»;
- $Q_i=(A_i, M_i)$ – «свод законов природы», характерных для i-го «мира»;
- $V_i=\{v_{i1}, v_{i2},\ldots\}$ – множество сущностей, населяющих «мир»;
- $X_i=\{x_{i1}, x_{i2},\ldots\}$ – множество отношений типа «возможно инфицирование» между сущностями;
- $A_i=\{a_{i1}, a_{i2},\ldots I_i\}$ – множество «атрибутов», которыми обладают сущности i-го «мира»;

- $M_i=\{m_{i1}, m_{i2},\ldots\}$ – множество «методов» поведения, характерных для сущностей *i*-го мира.

Во множестве атрибутов сущностей *i*-го «мира» выделим логический атрибут I_i, способный принимать значения «истина» или «ложь». Передача (точнее, копирование) значения этого атрибута от одной сущности «мира» к «другой» и соответствует операции «инфицирования» *i*-м типом «инфекции». При этом понятие «инфекция» понимается в широком смысле. Например, почти в любом варианте «вселенной» должен существовать некий *j*-ый «мир», населенный «здоровыми» (I_j=0) и/или «исцеляющими» (I_j=1) сущностями.

Очевидно, топология «вселенной» W представляет собой ориентированный мультиграф (см. рис. 1), представимый в виде объединения некоторого количества односвязных подграфов $G=(G_1 \cup G_2 \cup ...)$.

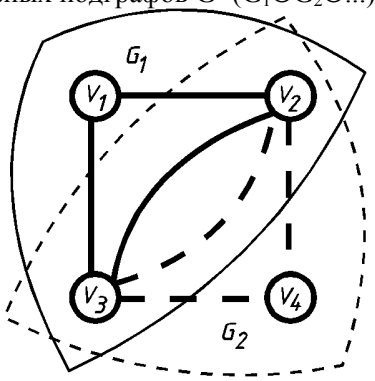

Рис. 1. Графовая модель моделируемой «вселенной»

Каждой вершине соответствует экземпляр сущности. Представление мультиграфа в виде совокупности подграфов позволяет моделировать сложный характер «инфицирования», когда, например, один «больной» экземпляр способен «инфицировать» других несколькими различными инфекциями (возможно, с различными вероятностями и при соблюдении различных условий).

3.Модели подграфов. Разрабатываемая система способна генерировать и использовать подграфы «миров», имеющие следующие структурные свойства (см. рис. 2).

1. Полный граф, в котором каждая вершина связана со всеми остальными. В полном графе из *n* вершин присутствуют все $N = \frac{n \times (n-1)}{2}$ возможных ребер. Такая топология характерна, прежде всего, для моделей, описывающих поведение программных сущностей в глобальных информационных сетях. Например, сетевые черви типа I-Worm.Msblast (2002 г.) способны напрямую обращаться к любому узлу сети Интернет, имеющему IP-адрес, а мобильные черви ComWarrior – к любому мобильному телефону в мире, имеющему номер в сетях сотовой связи [3, 13].

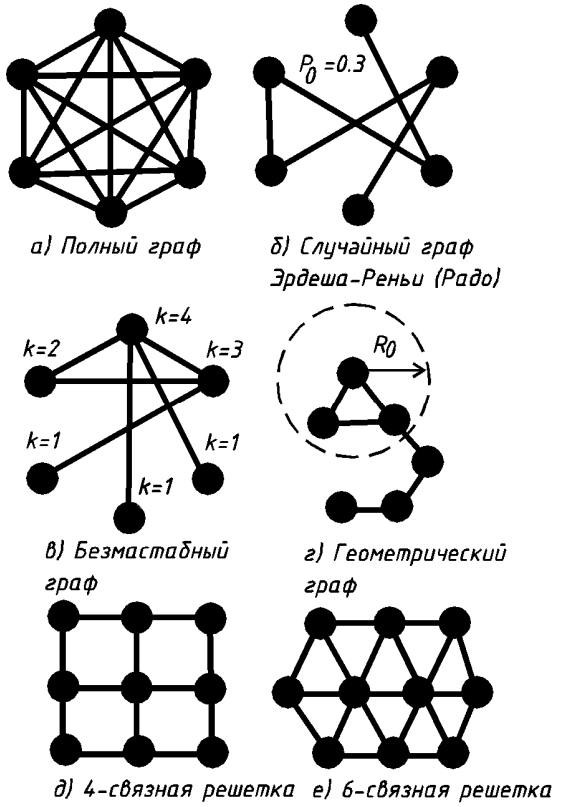

Рис.2. Графовые модели пространства

2. Регулярные (гомогенные) графы типа «решетка». Такая топология используется для решения различных задач в области теории перколяции, например, при исследовании распространения жидкости через пористые среды, взаимной диффузии металлов и пр. Параметром таких графов является «связность», то есть постоянное количество «соседей» для каждой вершины.

3. Случайные графы общего вида (они же графы Эрдеша-Реньи, они же графы Радо) – подграфы полных графов, в которых ребро между двумя любыми вершинами существует с постоянной вероятностью P_0 (и, разумеется, отсутствует с вероятностью 1-P_0). Полное количество ребер в таком графе из *n*

узлов $N \approx P_0 \frac{n \times (n-1)}{2}$, а степени (валентности) вершин k распределены по Пуассону: $f(k) = \frac{(nP_0)^k}{k!} e^{-(nP_0)}$. В работе [7] рассмотрены методы построения графов Радо с наперед заданными средней степенью вершин $\bar{k}$ или средним коэффициентом кластеризации $\bar{c}$.

4. «Безмасштабные» случайные графы, то есть графы, обладающие характерной структурной особенностью: немногие вершины обладают большой валентностью, а многие – малой. Более конкретно - распределение валентностей вершин подчиняется экспоненциальному закону $f(k) = k^{-\gamma}$, где $2 \le \gamma \le 3$. Графы такого типа служат моделями социальных, транспортных, инженерных и коммуникационных сетей, их свойства очень активно изучаются в последние десятилетия. Методы генерации таких сетей опираются на алгоритмы «предпочтительного присоединения» вершин [1], а в работе [12] рассмотрены подходы к генерации случайных «безмасштабных» графов с наперед заданными статистическими характеристиками.

5. «Геометрические» случайные графы (RGG), то есть графы, структурные свойства которых определяются некоторыми «геометрическими» отношениями между вершинами. Обычно они служат моделями «специальных» (ad hoc) сетей. В разрабатываемой системе применяется разновидность «геометрических» графов, в которой наличие ребра между двумя вершинами с индексами i и j зависит от расстояния R_{ij} между этими вершинами. Метрика при этом может быть разной: Евклидовой $R = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, «тороидальной» и т.п. Так же различной может быть и зависимость топологии от R. Например, для технических сетей (типа сетей сотовой связи) характерно наличие жесткой границы: если расстояние между двумя вершинами не превышает R_0, то ребро между ними существует, иначе – нет. Для моделирования же отношений в живой природе (например, при взаимодействии двух существ – здорового и больного воздушно-капельной инфекцией) характерна ситуация, когда вероятность P_0 наличия ребра обратно-пропорциональна R. Конкретный вид этой зависимости может быть линейным $P_0(R)=1-R$, эллиптическим $P_0(R) = \sqrt{1-R^2}$, параболическими $P_0(R)=1-R^m$ (при $m>1$) и т.п. Порог связности для «геометрических» графов $R_0 = \sqrt{\frac{\log n}{n\pi}}$. В работе [7] рассмотрены подходы к генерации случайных «географических» графов с наперед заданными статистическими характеристиками. Важно, что топология ad hoc графов может изменяться во времени, отражая тем самым способность сущностей перемещаться в пространстве относительно друг друга, устанавливая и теряя отношение «близости». Известно, например, что направление движения людей an mass распределено равномерно, а расстояние, на которое происходит движение, подчинено закону Леви [15].

6. Наконец, ad hoc графы, загружаемые извне, – например, сгенерированные средствами специальной программы, сопоставляющей топологию графа какой-нибудь конкретной геометрической структуре – местности или интерьеру [4].

4. Агентные модели сущностей. Определяющей особенностью агентных и мультиагентных методов имитационного моделирования является использование «агентов» - программных моделей экземпляров сущностей, обладающих автономностью, индивидуальностью и способностью взаимодействия с другими «агентами» и «внешней средой». Каждый агент обладает определенным набором свойств, которые в терминах объектно-ориентированного программирования можно отнести к двум классам: 1) атрибуты; 2) методы. Работа методов зависит от значений атрибутов, каковые, в свою очередь, могут изменяться в результате работы методов. «Инфицирование» заключается в копировании некоторого набора свойств (атрибутов и методов) из одного агента в другой, после чего «инфицированный» агент сам становится способным к самостоятельному «инфицированию» других агентов.

В алгоритмах действия «инфицированных» агентов можно выделить три основных аспекта: 1) состояние; 2) поиск

целей; 3) алгоритм «инфицирования».

4.1. Состояние. Под «состоянием» понимается набор признаков, характеризующих способность к «инфицированию» той или иной «инфекцией» либо, наоборот, восприимчивость (или невосприимчивость) к той или иной «инфекции». Пример набора состояний {*I, S, R*}, характерных для развития простых Интернет-эпидемий, рассмотрен выше. Можно его расширить за счет состояний *E* – «инфицирован, но не инфицирует»; *D* – «инфицирован, но неисцелен» и т.п. Следует учесть, что «биологические» аналогии не всегда корректны. Так, например, при моделировании лесного пожара состоянию *R*, скорее всего, соответствует не «исцеление», но «разрушение» дерева.

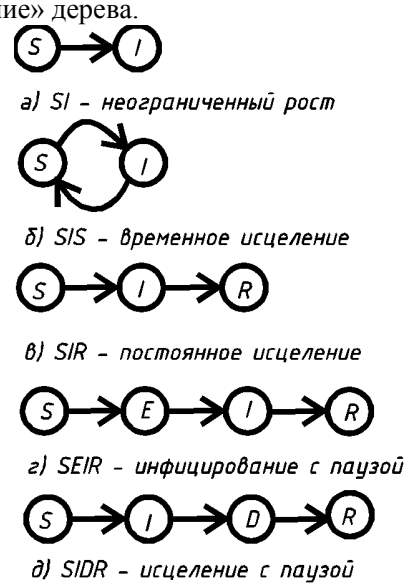

Рис. 3. «Популярные» модели эпидемий

Различные модели перехода сущности из состояния в состояние (SI, SIS, SIR, SEIR, SIDR и др.- см. рис. 3) изучаются на протяжении многих десятилетий (см., например, работу [9]), и разрабатываемая система безусловно должна поддерживать как их, так и иные, более изощренные модели.

4.2. Поиск целей. Важным аспектом моделирования процесса «инфицирования» является алгоритм поиска «целей» (то есть восприимчивых к «инфекции» агентов). Поиск выполняется среди «доступных» агентов, то есть тех, которым соответствуют вершины подграфа, инцидентные «инфицирующей». В работах [3, 20] рассмотрено большое количество стратегий поиска, которые могут быть сведены к 5 основным стратегиям.

1. Линейный поиск. Инфицирующие агенты выполняют последовательный перебор всех (или выделенного подмножества) доступных им агентов, пытаясь их «инфицировать». Это наименее эффективная стратегия, которая, тем не менее, находит применение в примитивных сетевых червях (например, Net-Worm.Cholera [3]).

2. Случайный поиск. Инфицирующие агенты выполняют случайный перебор всех (или выделенного подмножества) доступных им агентов, пытаясь их «инфицировать». Это наиболее популярная и хорошо изученная стратегия, использованная множеством Интернет-червей (например, I-Worm.RedCode.b [3, 19]).

3. Поиск по списку. Инфицирующие агенты выполняют последовательный или случайный перебор выделенного подмножества доступных им агентов, восприимчивость к инфекции которых известна заранее. Данная стратегия является, например, элементом субоптимальной стратегии поведения гипотетического червя Уорхола [19].

4. Контратака. Инфицирующий агент выполняет «инфицирование» только тех агентов, которые, в свою очередь, попытались «инфицировать» его. Такая стратегия характерна для сетевых «контрчервей» [3], но можно найти ее аналогии и в «жизни» - например, когда врач оказывает медицинскую помощь только «чихающим» пациентам.

5. Одновременное «инфицирование». Стратегия, имеющая «биологические» и «природные» аналогии, - например, когда распространение огня от горящего дерева происходит сразу на все близкорасположенные деревья. При моделировании может быть реализована, как частный случай «линейного поиска» или «случайного поиска» с нулевыми затратами времени на сканирование.

В реальности встречаются как упомянутые стратегии в чистом виде, так и их комбинации. Так, например, червь Net-Worm.Win32.Lovesan с вероятностью 0.6 использовал стратегию «случайного поиска», и вероятностью 0.4 – «линейного» [3]. А в работе [14] рассматривается алгоритм работы гипотетического «самообучающегося» червя, самостоятельно выбирающего стратегию поиска в зависимости от накопленной статистики удачных и неудачных попыток

«инфицирования».

Система моделирования поддерживает как «базовые» стратегии поиска, так и несложные их комбинации.

4.3. Алгоритм инфицирования. Этот аспект характеризует, в первую очередь, «темпоральные» характеристики работы «инфицирующей» сущности, от которых зависят «темпоральные» характеристики развития всей эпидемии. Например, в алгоритме работы дискретно-событийной модели простого сетевого червя (см. рис. 4) важную роль играют пять настраиваемых «темпоральных» атрибутов, позволяющих управлять таким параметром эпидемии, как «коэффициент» размножения β - то есть, средним количеством «инфицирований», выполняемых в единицу времени [16,19].

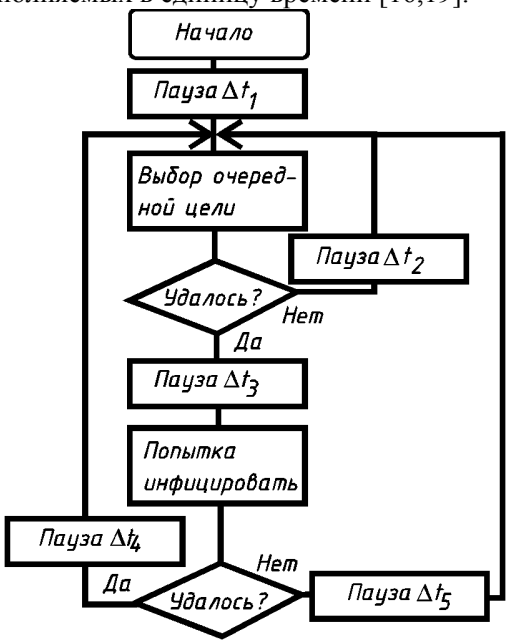

Рис. 4. Алгоритм работы простого сетевого червя

В общем случае эти атрибуты не являются константами, и значение их может зависеть, например, от количества ранее уже «инфицированных» сущностей. Это позволяет воспроизводить, например, так называемые «двухфакторные» модели эпидемий, учитывающие влияние падения (в результате перегрузки) пропускной способности линий связи между узлами коммуникационной сети.

5. Реализация. Разработка и реализация среды моделирования выполняется силами преподавателей и студентов Самарского Университета на инициативной основе и является частью учебного процесса, заключенного в рамках курсового и дипломного проектирования. На текущий момент многочисленные варианты реализации представлены в виде набора исследовательских прототипов, имеющих общую структурную организацию (см. рис. 5).

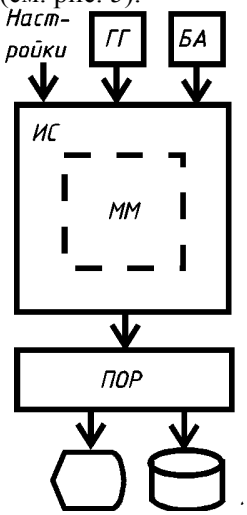

Рис. 5. Структурно-функциональная схема моделирующей системы

Ядром системы является «исполняющая среда» (ИС), оформленная в виде динамически загружаемой библиотеки для операционной системы Windows. Основное назначение – дискретно-событийная «интерпретация» модельных образов моделируемых «вселенных» (ММ), сформированных на этапе описания конкретного имитационного эксперимента. Во время выполнения имитационного эксперимента собираются необходимые характеристики моделируемых процессов, возможна их (процессов) демонстрационная визуализация (см. рис. 6).

Построение ММ выполняется из отдельных компонентов, собранных в БА – библиотеке алгоритмов работы агентов, и формируемых при помощи ГГ – генератора графов. БА и ГГ так же оформлены в виде динамически загружаемых библиотек.

По итогам выполнения эксперимента подсистема обработки результатов.(ПОР) позволяет рассчитать необходимые характеристики (например, усредненные кривые развития эпидемий), предназначенные для дальнейших визуализации и протоколирования.

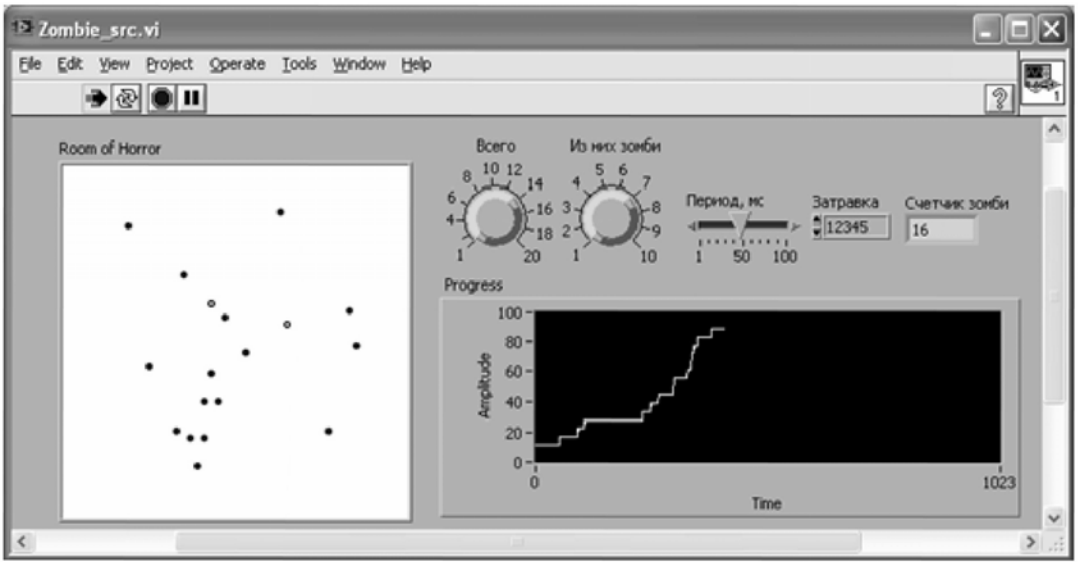

Рис. 6. Тестирование исполняющей среды. Настойки и визуализация средствами LabView

Поскольку интерфейс доступа к DLL стандартизован, то агрегация всех программных компонентов в единое целое может быть выполнена по-разному: путем компоновки с собственным программным проектом или при помощи подключения к какой-нибудь готовой инструментальной среде (см. рис. 6).

Литература

1. Берновский М.М., Кузюрин Н.Н. Случайные графы, модели и генераторы безмасштабных графов // В сб. "Труды Института системного программирования РАН." Том 22, - 2012 г. - С. 419-434.

2. Карпов, Ю. Г., «Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5». — СПб: БХВ-Петербург, 2006. — 400 с.

3. Климентьев К.Е. Компьютерные вирусы и антивирусы: взгляд программиста. – М.: ДМК-Пресс, 2013. – 656 с.

4. Климентьев К.Е. Применение ГИС-технологий при исследовании распространения вредоносных программ // В сб. «Геоинформационные технологи в проектировании и создании корпоративных информационных систем. Межвузовский научн. сборник». – Уфа: изд-во УГАТУ. – 2012. – С. 130-133.

5. Климентьев К.Е., Помянский Р.А. Три подхода к моделированию сетевых эпидемий// В сб. «Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении (ПИТ 2012): труды научн-техн. конф. с межд. Участием» – Самара: изд-во СНЦ РАН, 2012. – С. 31-34.

6. Климентьев К.Е. Аналитические модели взаимодействия мобильных агентов // В сб. «Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении (ПИТ 2013): труды научн-техн. конф. с межд. Участием» – Самара: изд-во СНЦ РАН, 2013. – С. 54-56.

7. Климентьев К.Е. Случайные графы как модель среды распространения и взаимодействия саморазмножающихся объектов // В сб. «Известия самарского научного центра РАН», Том 17, №2(5).- Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2015. – С. 1021-1025.

8. Кондратьев М.А. Методы прогнозирования и модели распространения заболеваний // В сб. «Компьютерные исследования и моделирование». - 2013. - Том 5, №5. - С. 863-882.

9. Котенко И.В., Воронцов В.В. Аналитические модели распространения сетевых червей // Труды СПИРАН. Вып 4. – СПб: Наука, 2007. – С. 208-224.

10. Лери М.М., Павлов Ю.Л. Лесной пожар на случайном графе со сгораемыми ребрами // Ученые записки Петрозаводского государственного университета, 2013, №2. - С.96-99.

11. Улыбин А.В., Арзамасцев А.А. Имитационное моделирование развития

инфекции с использованием агентного подхода // В сб. «Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки». - 2010. - том 15.№2. - с. 614-619.

12. Юдин Е.Б. Генерация случайных графов предпочтительного связывания // Омский научный вестник. – 2010. – №2 (90). – С. 7-13

13. Channakeshava K. High performance, scalable, and expressive modeling environment to study mobile malware in large dynamic networks. Diss. thes. of phd / Virginia Polytechnic Institute, 2010. - 142 pp.

14. Chen Z., Ji C. A self-learning Worm Using Importance Scanning // ACM CSS Workshop on Rapid Malcode (WORM'05), 2005.- Pp. 22-29.

15. Gonzalez M., Hidalgo C., Barabasi A. Understanding Individual Human Mobility Patterns // Nature, Vol.453, 2008. – Pp. 779-783.

16. Kephart J. O., White S. R. Directed-graph epidemiological models of computer viruses // Proceedings of the 1991 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy. Oakland, California, 1991. - Pp. 343–359.

17. Smith R., Munz P., Hudea I, Imad J. When Zombies Attack: Mathematical Modeling of an Outbreak of Zombie Infection // Infectious Disease Modelling Research Progress. - Nova Science Publishers, Inc. – pp. 133-157.

18. Tanachaiwiwat S., Helmy A. VACCINE: War of the worms in wired and wireless networks // IEEE INFOCOM, 2006.

19. Weaver N.C. Warhol Worms: The potential for very fast internet plagues? - 2001. - Режим доступа: http://www1.icsi.berkeley.edu/nweaver/papers/warhol/warhol.html.

20. Zou C., Towsley D., Gong W. On the Performance of Internet Worm Scanning Strategies // Technican Report TR-03-CSE-07 of Univ. Massachusetts, Amherst, 2007. - 16 pp.

A MULTY-AGENT SIMULATING OF DISSEMINATION AND INTERACTION OF INFECTIOUS OBJECTS

Constantin E. Climentieff, *Ph.D.* (*Engineering*), *Associate Professor, climentieff@ro.ru*
(*Samara National Research University , Moskovskoe shosse 34, Samara 443086, Russia*)

Abstract. The article discusses the main approaches to the multi-agent simulation of the "infectious" processes in technical networks and wildlife. The examples of such processes are: the epidemics of pathogens among the living creatures; dissemination of computer viruses and worms; expansion of forest fires; message transfer in the technical and social networks, etc. The article describes a general models of "universe" and "worlds". It analyzes the graph models of "world", such as: a full graph, scale-free graph, "geometric" graph and various grids. The different models of state transitions, including SI, SIS, SIR, SEIR, SIDR, etc., also discussed in the article. Also it discusses various methods for target scanning, such as: a sequential scan, random scan, hitlist scan, "counterattack" and so on. It describes the method for setting the temporal characteristics of the individual agents. It also examines the architecture of modeling system that supports of aspects discussed above. Also an example of software implementation is presented.

Keywords: modeling, computer virus, networm, pathogen, firestorm, epidemic, dissemination, disease, multi-agent, simulation, network, random graph, scale-free graph, Rado graph, geometric graph, grid, SI, SIS, SIR, SEIR, SIDR, sequential scanning, random scanning, hitlist scanning, system, software implemrntation.

References

1. Bernovskiy M.M., Kuzyurin N.N. Sluchaynyye grafy, modeli i generatory bezmasshtabnykh grafov // V sb. "Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN." Tom 22, - 2012 g. - S. 419-434.

2. Karpov, YU. G., «Imitatsionnoye modelirovaniye sistem. Vvedeniye v modelirovaniye s AnyLogic 5». — SPb: BKHV-Peterburg, 2006. — 400 s.

3. Climentieff C.E. Komp'yuternyye virusy i antivirusy: vzglyad programmista. – M.: DMK-Press, 2013. – 656 s.

4. Climentieff C.E. Primeneniye GIS-tekhnologiy pri issledovanii rasprostraneniya vredonosnykh programm // V sb. «Geoinformatsionnyye tekhnologi v proyektirovanii i sozdanii korporativnykh informatsionnykh sistem. Mezhvuzovskiy nauchn. sbornik». – Ufa: izd-vo UGATU. – 2012. – S. 130-133.

5. Climentieff C.E., Pomyanskiy R.A. Tri podkhoda k modelirovaniyu setevykh epidemiy// V sb. «Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovanii i obuchenii (PIT 2012): trudy nauchn-tekhn. konf. s mezhd. Uchastiyem» – Samara: izd-vo SNTS RAN, 2012. – S. 31-34.

6. Climentieff C.E. Analiticheskiye modeli vzaimodeystviya mobil'nykh agentov // V sb. «Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovanii i obuchenii (PIT 2013): trudy nauchn-tekhn. konf. s mezhd. Uchastiyem» – Samara: izd-vo SNTS RAN, 2013. – S. 54-56.

7. Climentieff C.E. Sluchaynyye grafy kak model' sredy rasprostraneniya i vzaimodeystviya samorazmnozhayushchikhsya ob"yektov // V sb. «Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra RAN», Tom 17, №2(5).- Samara: Izd-vo SNTS RAN, 2015. – S. 1021-1025.

8. Kondrat'yev M.A. Metody prognozirovaniya i modeli rasprostraneniya zabolevaniy // V sb. «Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye». - 2013. - Tom 5, №5. - S. 863-882.

9. Kotenko I.V., Vorontsov V.V. Analiticheskiye modeli rasprostraneniya setevykh chervey // Trudy SPIRAN. Vyp 4. – SPb: Nauka, 2007. – S. 208-224.

10. Leri M.M., Pavlov YU.L. Lesnoy pozhar na sluchaynom grafe so sgorayemymi rebrami // Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta, 2013, №2. - S.96-99.

11. Ulybin A.V., Arzamastsev A.A. Imitatsionnoye modelirovaniye razvitiya infektsii s ispol'zovaniyem agentnogo podkhoda // V sb. «Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki». - 2010. - tom 15.№2. - s. 614-619.

12. YUdin E.B. Generatsiya sluchaynykh grafov predpochtitel'nogo svyazyvaniya // Omskiy nauchnyy vestnik. – 2010. – №2 (90). – S. 7-13.

13. Channakeshava K. High performance, scalable, and expressive modeling environment to study mobile malware in large dynamic networks. Diss. thes. of phd / Virginia Polytechnic Institute, 2010. - 142 pp.

14. Chen Z., Ji C. A self-learning Worm Using Importance Scanning // ACM CSS Workshop on Rapid Malcode (WORM'05), 2005.- Pp. 22-29.

15. Gonzalez M., Hidalgo C., Barabasi A. Understanding Individual Human Mobility Patterns // Nature, Vol.453, 2008. – Pp. 779-783.

16. Kephart J. O., White S. R. Directed-graph epidemiological models of computer viruses // Proceedings of the 1991 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy. Oakland, California, 1991. - Pp. 343–359.

17. Smith R., Munz P., Hudea I, Imad J. When Zombies Attack: Mathematical Modeling of an Outbreak of Zombie Infection // Infectious Disease Modelling Research Progress. - Nova Science Publishers, Inc. – pp. 133-157.

18. Tanachaiwiwat S., Helmy A. VACCINE: War of the worms in wired and wireless networks // IEEE INFOCOM, 2006.

19. Weaver N.C. Warhol Worms: The potential for very fast internet plagues? - 2001. - Режим доступа: http://www1.icsi.berkeley.edu/nweaver/papers/warhol/warhol.html.

20. Zou C., Towsley D., Gong W. On the Performance of Internet Worm Scanning Strategies // Technican Report TR-03-CSE-07 of Univ. Massachusetts, Amherst, 2007. - 16 pp.