

СЛУЧАЙНЫЕ ГРАФЫ С НЕЛИНЕЙНЫМ ПРАВИЛОМ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО СВЯЗЫВАНИЯ В СИСТЕМЕ АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMBIGRAPH

Е. Б. Юдин, В. Н. Задорожный, Е. А. Пендер (Омск)

Введение

В соответствии с выводами европейского сообщества по развитию агентных вычислений AgentLink III [1] приоритетным направлением развития теории агентного моделирования является разработка сетевых структур взаимодействия между агентами. В системе агентного имитационного моделирования (СИМ) SIMBIGRAPH [2] такие структуры реализуются и поддерживаются разнообразными графовыми моделями среды взаимодействия агентов. В работах [3, 4] SIMBIGRAPH используется в качестве базового инструмента анализа сложных процессов в сетях и решетках (рис. 1).

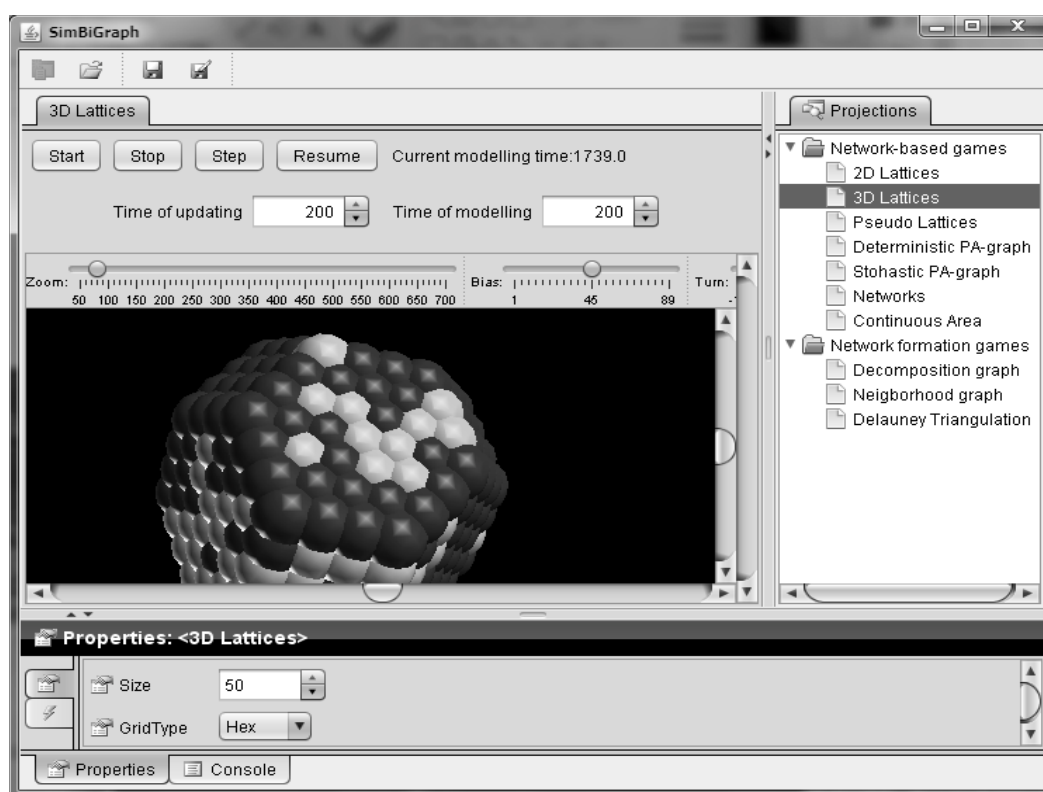


Рис. 1. Моделирование в SIMBIGRAPH процесса сегрегации атомов на поверхности биметаллической наночастицы

СИМ SIMBIGRAPH является программой с открытым кодом, зарегистрированной на сайте <http://sourceforge.net>.

Сетевые структуры в SIMBIGRAPH

Для моделирования сетевых структур SIMBIGRAPH предоставляет:

✓ широкий набор средств моделирования решеток (реализованы взаимодействия агентов в гексагональной, квадратной, треугольной, кубической решетках, а также в решетке, образуемой гранецентрированной кубической упаковкой шаров);

- ✓ широкий набор генераторов случайных графов, в том числе генераторы случайных графов с нелинейным правилом предпочтительного связывания (сл.г. с НППС [5]), графов Барабаши-Альберт (графов БА [6]), графов Эрдеша-Реньи, Эпштейна, конфигурационных версий безмасштабных графов и т.д.;
- ✓ средства калибровки генерируемых графовых моделей по имеющимся статистическим данным о моделируемых реальных сетях;
- ✓ импорт/экспорт файлов с использованием широко распространенных форматов представления графов;
- ✓ широкий набор методов для анализа статистических характеристик графов;
- ✓ широкие возможности визуализации графов (рис. 2).

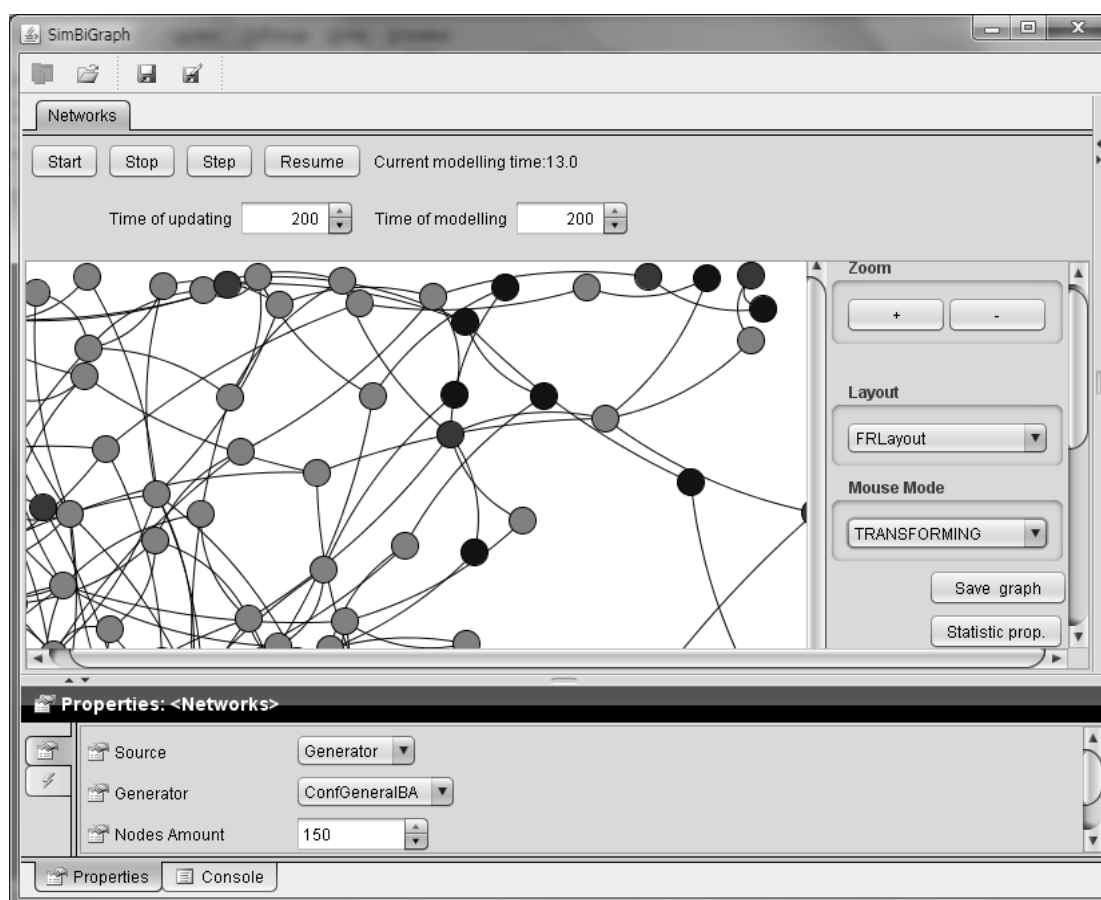


Рис. 2. Моделирование графов в SIMBIGRAPH. На панели Properties: <Networks> задаются параметры генератора графа. В окне отображения модели в интерактивном режиме можно изменять масштаб, выбирать алгоритм отображения графа и т.д.

После построения графа имитационное моделирование в SIMBIGRAPH заключается в программировании агентов (параллельно функционирующих активных существей) на языке JAVA, запуске имитации, автоматическом сборе данных и их анализе.

Граф БА и случайные графы с НППС

Рассмотрим генератор графа БА (реализован во многих СИМ, например, в AnyLogic) и генератора сл.г. с НППС (реализован впервые в SIMBIGRAPH).

Граф БА «выращивается» из небольшого графа-затравки путем многошагового процесса добавления новых вершин с фиксированным числом ребер $m \geq 1$. Свободный конец каждого нового ребра присоединяется к имеющейся i -й вершине графа, которая выбирается случайно с вероятностью p_i , пропорциональной локальной степени связности k_i этой вершины:

$$p_i = k_i / \sum_j k_j. \quad (1)$$

Распределение степени связности вершин (РСС) при генерации графа БА асимптотически (при $k \rightarrow \infty$) пропорционально $k^{-\alpha}$: $Q_k \propto k^{-\alpha}$, где Q_k – вероятность того, что случайно выбранная вершина имеет степень связности k . Распространенность степенного РСС (рис. 3; масштаб логарифмический) привело к широкому использованию графов БА при моделировании таких сетей, как Интернет, социальные сети и т.д.

На каждом шаге генерации сл.г. с НППС к графу добавляется новая вершина со случайным числом x ($g \leq x \leq h$) ребер (случайное приращение графа). Вероятность p_i связывания нового ребра с i -й вершиной графа пропорциональна функции предпочтения f от k_i :

$$p_i = f(k_i) / \sum_j f(k_j). \quad (2)$$

Функцию $f(k) = f_k$ можно задать рядом $f = f_g, f_{g+1}, \dots, f_k, \dots$, в котором $f_g > 0$ и $f_k \geq 0$ при $k > g$. Из (1)–(2) видно, что граф БА является частным случаем сл.г. с НППС.

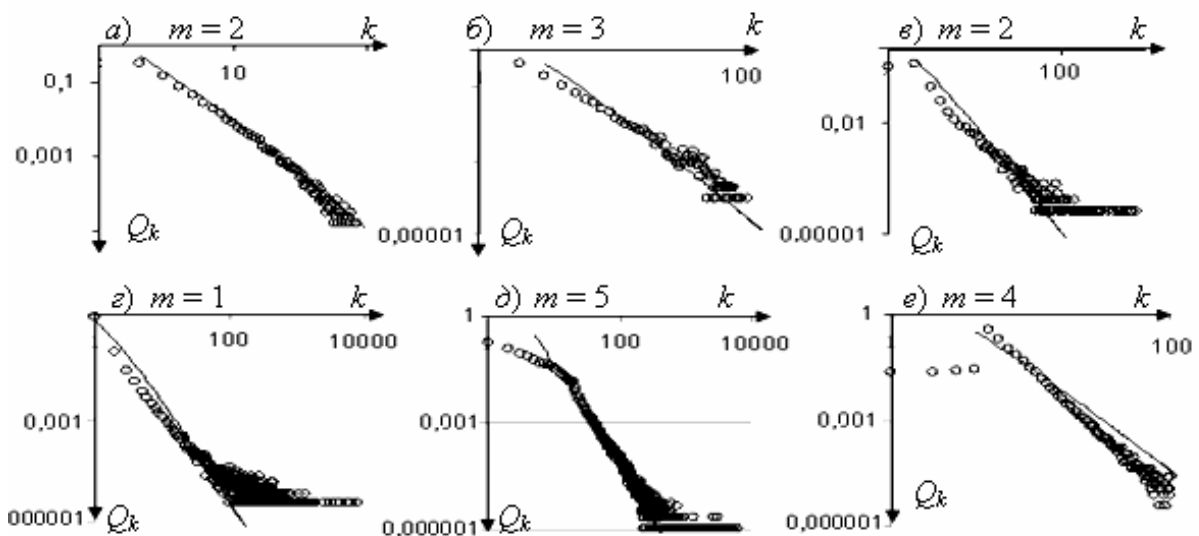


Рис. 3. РСС в реальных сетях (маркеры) и в моделирующих их графах БА (линия):
 а – сеть маршрутизаторов; б – сеть пользователей программы PGP; в – сеть автономных систем Интернет; г – сеть адресов электронной почты; д – сеть ссылок веб-страниц; е – сеть товаров Интернет-магазина Amazon

В SIMBIGRAPH калибровка сл.г. с НППС (подбор параметров генератора) автоматизирована и позволяет выращивать графы с заранее заданным РСС. На рис. 4–5 представлены РСС в реальных сетях и в калиброванных сл.г. с НППС.

Для калибровки параметров генераторов сл.г. с НППС формируется класс на языке JAVA, реализующий функцию предпочтения и случайное приращение ребер методами из [5]. Пользователь SIMBIGRAPH имеет возможность вручную редактировать код (рис. 6), устанавливать число шагов генерации, указывать граф-затравку. Сформированный код компилируется, и запускается процесс генерации графа.

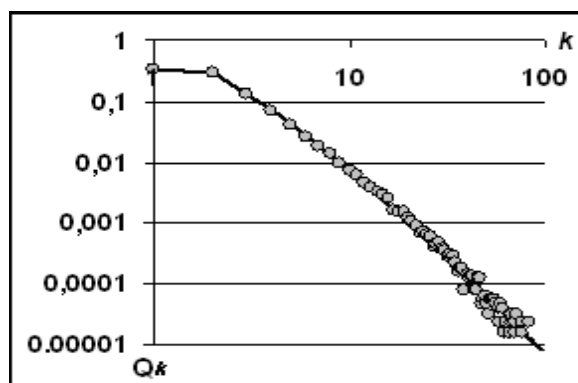


Рис. 4. PCC калиброванного графа и сети маршрутизаторов Интернет

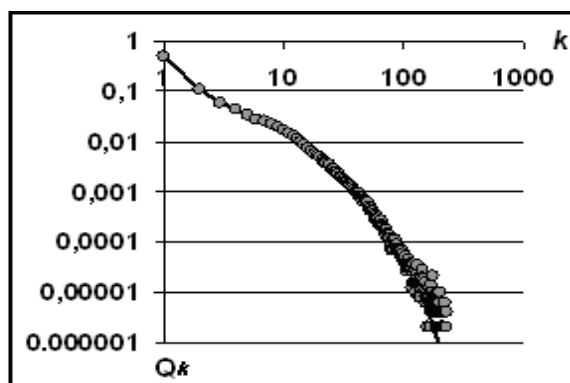


Рис. 5. PCC калиброванного графа и сети участия актеров в общих фильмах

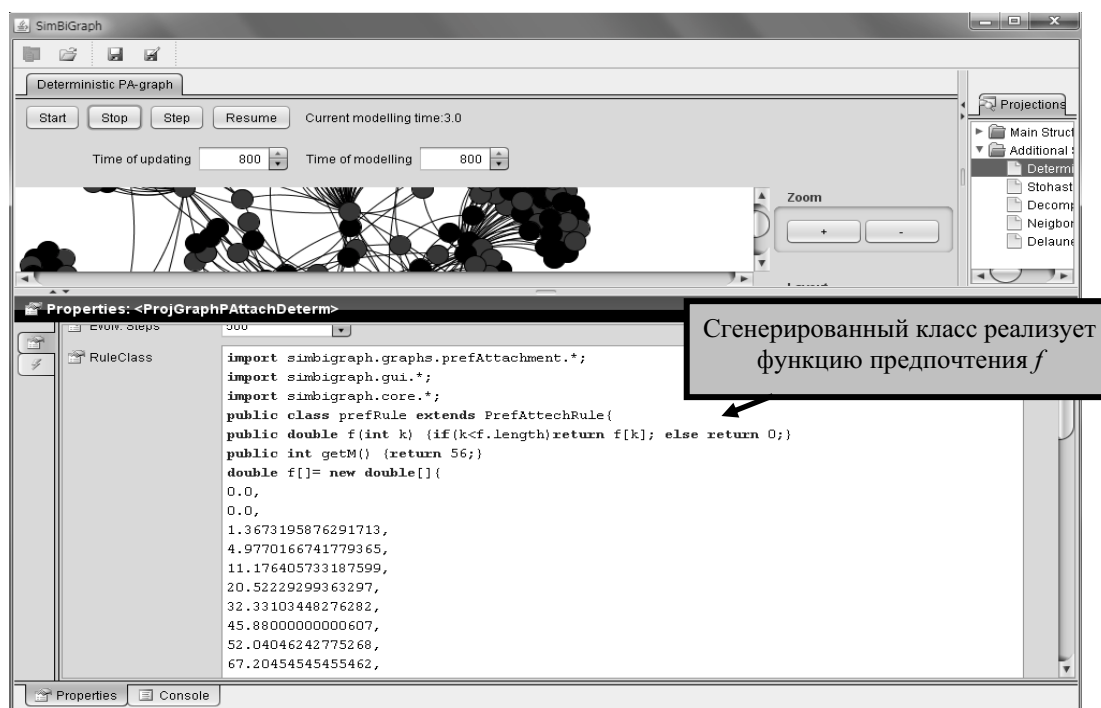


Рис. 6. Калибровка параметров генерации сл.г. с НППС в SIMBIGRAPH

Пример применения: исследование устойчивости сети Интернет

Графовые модели эффективно используются для исследования устойчивости сетей. Так, Р. Пастор-Саторас и А. Виспиани продемонстрировали, что пороговая сопротивляемость графов БА к распространению вирусов сходится к нулю с ростом числа вершин, что объясняет необычную «живучесть» вирусов в биологических и компьютерных сетях. Другое интересное свойство графов БА, установленное Ш. Хавлином, заключается в том, что такие графы очень устойчивы к случайным удалениям вершин/ребер (так моделируются случайные отказы), но чувствительны к целенаправленным «атакам» на концентраторы (когда удаляются узлы с высокой связностью).

Рассмотрим устойчивость при случайных отказах сети Интернет на основе ее моделирования графами БА и сл.г. с НППС (рассматриваются модели, которые входят

в число демонстрационных примеров SIMBIGRAPH). Моделирование случайных отказов заключается в проведении на сл.г. с НППС и графах БА серии экспериментов, в каждом из которых с заданной вероятностью удаляются вершины/ребра и размер максимального контактного кластера сравнивается с размером максимального кластера при моделировании на сети маршрутизаторов [6]. Как видно из рис. 7, при моделировании устойчивости к случайным удалениям узлов/ребер на сл.г. с НППС получены более точные результаты, чем на графе БА, что свидетельствует о большей адекватности сл.г. с НППС.

Это подтверждается и при моделировании распространения вируса. Рассмотрим, например, модель «восприимчивый – инфицированный – восприимчивый». Узлы сети могут находиться в двух состояниях: «восприимчивый» и «инфицированный». На каждом шаге моделирования инфицированный узел может инфицировать смежный ему восприимчивый с вероятностью ν , и в то же время сам узел может перейти в состояние «восприимчивый» с вероятностью δ . Коэффициент распространения λ определим как $\lambda = \nu/\delta$. На рис. 8 представлена зависимость плотности инфицированных вершин ρ от λ , полученная при имитационном моделировании в SIMBIGRAPH.

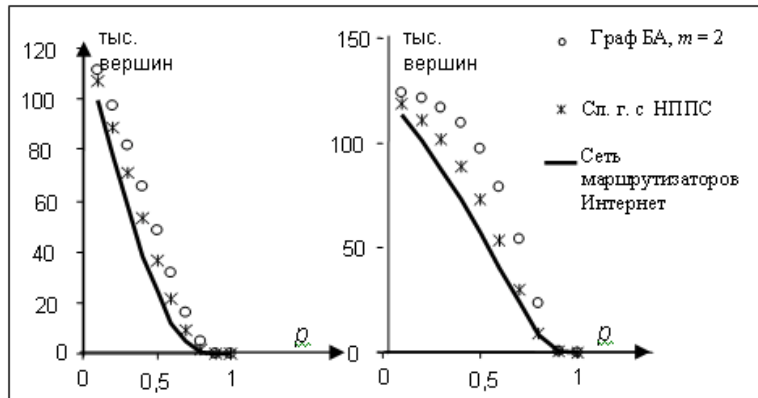


Рис. 7. Зависимость размера максимального кластера от вероятности случайного удаления узлов (слева) или связей (справа) в сети маршрутизаторов Интернет, в графах в БА и сл.г. с НППС (124651 узлов)

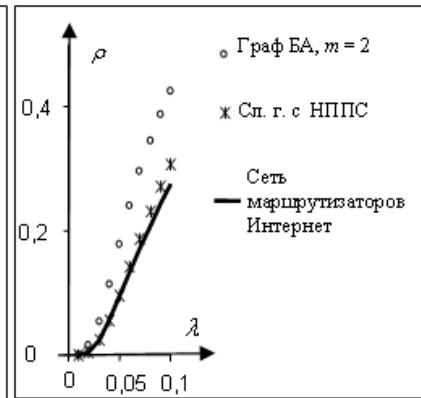


Рис. 8. Зависимость плотности инфицированных вершин ρ от коэффициента распространения λ

Заключение

Система агентного моделирования SIMBIGRAPH обладает широкими возможностями генерации графовых моделей и проведения на них имитационных экспериментов. В частности, в SIMBIGRAPH впервые реализованы средства калибровки генераторов случайных графов с НППС на основе статистических данных о реальных сетях.

Сравнение результатов моделирования сети маршрутизаторов Интернет двумя видами графов позволяет сделать вывод о существенных преимуществах графов с НППС [5], реализованных в SIMBIGRAPH. Использование сл.г. с НППС, методов их генерации и калибровки позволяет принципиально повысить адекватность графовых моделей и радикально улучшить точность и обоснованность результатов решения множества актуальных задач, связанных с контролем, управлением и оптимизацией процессов в таких сетях, как Интернет, сети социальных контактов, сети товаров, биологические сети и многие другие.

Литература

1. Roadmap of AgentLink III, the European Coordination Action for Agent-Based Computing (IST-FP6-002006CA) edited by Michael Luck et al., AgentLink III, 2005. 108 p.
2. Система агентного моделирования SIMBIGRAPH / В. Н. Задорожный, Е. Б. Юдин // Свидетельство о регистрации электронного ресурса №16539 / Объединённый фонд электронных ресурсов «Наука и Образование», 2011. № 50201050316.
3. **Коробов В. В.** Создание среды для последующего моделирования вирусного маркетинга // Прикладная математика и фундаментальная информатика: Сб. науч. трудов. Омск, 2011. С. 103–105.
4. **Ганеева М. И., Огнев Д. А., Пендер Е. А.** Построение агентных моделей в системе моделирования SIMBIGRAPH // Информационные технологии и автоматизация управления, матер. регион. конф. Омск, 2011. С. 103–105.
5. **Задорожный В. Н.** Случайные графы с нелинейным правилом предпочтительного связывания // Проблемы управления. 2010. № 6. С. 2–11.
6. **Barabasi A., Albert R.** Emergence of scaling in random networks // Science. 1999. Vol. 288. P. 60-69.
7. Сеть маршрутизаторов Интернет, 2006 г., URL: <http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/mat/Pajek/internet.mat> (дата обращения: 01.09.2009).