

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ И ЕЕ АНАЛИЗ

Р.Е. Шарыкин

Белорусский государственный университет, Минск;

sharykin@bsu.edu;

науч. рук. – А. Н. Курбацкий, д-р. техн. наук, проф.

Предложена математическая модель для Распределенных Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем. Объектно-Ориентированные Стохастические Гибридные Системы являются композиционными объектами, общающимися с другими объектами посредством обмена сообщений через асинхронную среду, такую как сеть. Такие задачи часто встречаются на практике в различных сферах и вопросы формального моделирования и верифицирования их свойств представляются очень важными. Проведено доказательство, что данная модель обладает марковским свойством. Также были разработан язык спецификации Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем и метод их статистического анализа.

Ключевые слова: математическое моделирование; гибридные системы; стохастические системы; марковское свойство; спецификация моделей; верификация моделей

ВВЕДЕНИЕ

Стохастические гибридные системы [1] обобщают обычные гибридные системы [2], [3], [4], [5], допуская непрерывную эволюцию, управляемую стохастическими дифференциальными уравнениями (СДУ) и/или допуская мгновенные вероятностные изменения состояния системы. Это хорошо согласуется с внутренней неопределенностью сред, в которых должны функционировать многие гибридные системы, а также очень удобно в случаях, когда некоторые алгоритмы системы являются вероятностными. Существует широкий спектр сфер, включающий коммуникационные сети [6], авиационный трафик [7], [8], страхование [9], отказоустойчивое управление [10], подходящих для применения подобных систем. Биоинформатика, в которой используются символические, гибридные и вероятностные модели клеток [11], [12], [13] также является полем приложения для стохастических гибридных систем.

В то время, как уже существует надежное обоснование математических свойств стохастических гибридных моделей, таких как марковское свойство процесса, вопрос, как *специфицировать* такие системы *композиционным* путем, так, чтобы более крупные системы могли бы пониматься в терминах меньших подсистем, остается во многом открытым.

Также, вопрос о том, как *формально анализировать* такие системы способами, которые существенно расширяют аналитические возможности современных симуляционных методов, остается открытым. Так как некоторые области приложения (к примеру контроль авиационного трафика) требуют очень высокой степени надежности, спецификация и верификация являются важными проблемами, которые необходимо рассматривать.

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными целями исследования является построение математической модели РООСГС, доказательство марковского свойства процесса, определяемого данной моделью, разработка языка спецификации данных систем и метода статистического анализа, позволяющего получать оценки количественных аспектов системы, задаваемых с помощью языка с проработанными синтаксисом и семантикой.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы представляем математическую модель [14], позволяющую формально специфицировать стохастические гибридные системы, которые являются *распределенными* и состоящими из различного вида *стохастических гибридных объектов*, взаимодействующими друг с другом посредством *асинхронной передачи сообщений*. Стиль распределенного объектно-ориентированного описания представляется естественным для спецификации многих подобных систем: к примеру, сетевые встроенные системы или системы, состоящие из воздушных судов и других, возможно автоматических, транспортных средств. Однако, мы не имеем информации о формальных моделях, на текущий момент поддерживающих такой стиль спецификации для стохастических гибридных систем. Наш вклад в этом отношении представляет собой математическую модель Распределенных Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем (РООСГС), которая обладает марковским свойством и может быть отображена [14] в модель Generalized Stochastic Hybrid Systems (GSHS), представленную в [15], тем самым наследуя свойство марковости процесса порожденного нашей моделью.

Мы разработали метод статистического анализа модели РООСГС [16]. Данный акцент объясняется тем, что при проектировании системы на практике, необходимо получать быстрые ответы о свойствах системы, которые позволили бы «доработать» ее детали на начальных этапах формулирования и разработки системы. Основу данного метода представляет

собой метод Монте-Карло, который, ввиду марковского свойства модели, мы можем реализовать без излишних затрат.

Для спецификации представленной нами модели РООСГС мы предлагаем использовать SHYMaude [16], язык спецификации систем РООСГС. Спецификация SHYMaude может быть легко транслирована в спецификацию переписывающей логики системы Maude [17], которая, в свою очередь, может быть прямо симулирована в Maude [17]. Далее, спецификация Maude может быть подвергнута анализу статистической проверки моделей с использованием системы MultiVeStA [18]. Для задания свойств мы предлагаем использовать язык темпоральных количественных выражений QuaTE_x [19], который основывается на обобщении темпоральной логики и имеет проработанные синтаксис и семантику [19]. Таким образом, вероятностные темпорально-логические свойства стохастической гибридной системы могут быть проанализированы с желаемой точностью статистической значимости, основываясь на симуляциях Монте-Карло. В качестве примеров мы продемонстрировали этот тип анализа проверки моделей для двух частных случаев, а именно системы термостатов с центральным сервером, агрегирующим информацию и аукциона второй цены представленных в [16].

Библиографические ссылки

1. *Pola G., Bujorianu M.L.* Stochastic hybrid models: An overview // In Proceedings IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems. 2003. P. 45–50.
2. *Maler O., Manna Z., Pnueli A.* From timed to hybrid systems // Real-Time: Theory in Practice, REX Workshop. 1991. P. 447–484.
3. *Alur R., Courcoubetis C., Halbwachs N.* The Algorithmic Analysis of Hybrid Systems // Theoretical Computer Science. 1995. Vol. 138, № 1. P. 3–34.
4. *Lynch N.A., Segala R., Vaandrager F.W.* Hybrid I/O automata // Information and Computation. 2003. Vol. 185, № 1. P. 105–157.
5. *Alur R., Dang T., Esposito J.M.* Hierarchical modeling and analysis of embedded systems // Proceedings of the IEEE. 2003. Vol. 91, № 1. P. 11–28.
6. *Hespanha J.P.* Stochastic Hybrid Systems: Application to Communication Networks // Hybrid Systems: Computation and Control, 7th International Workshop. 2004. P. 387–401.
7. *Hwang I., Hwang J., Tomlin C.J.* Flight-model-based aircraft conflict detection using a residual-mean interacting multiple model algorithm // In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2003.
8. *Hwang I., Hwang J., Tomlin C.J.* HYBRIDGE. Final project report. 2005. URL: <https://hybridge.nlr.nl/documents.html> (дата обращения: 09.06.2020).
9. *Davis M.H.A., Vellekoop M.H.* Permanent Health Insurance: A Case Study in Piecewise-Deterministic Markov Modelling // Mitteilungen der Schweiz. Vereinigung der Versicherungsmathematiker. 1995. Vol. 2. P. 177–212.
10. *Ghosh M.K., Arapostathis A., Marcus S.I.* Optimal control of switching diffusions with application to flexible manufacturing systems // SIAM Journal on Control Optimization. 1993. Vol. 35. P. 1183–1204.

11. *Eker S., Knapp M., Laderoute K.* Pathway Logic: Symbolic Analysis of Biological Signaling // Proceedings of the 7th Pacific Symposium on Biocomputing. 2002. P. 400–412.
12. *Lincoln P., Tiwari A.* Symbolic Systems Biology: Hybrid Modeling and Analysis of Biological Networks // Hybrid Systems: Computation and Control, 7th International Workshop. 2004. P. 660–672.
13. *Goss P.J.E., Peccoud J.* Quantitative modeling of stochastic systems in molecular biology by using stochastic Petri nets // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1998. Vol. 95, № 12. P. 6750–6755.
14. *Шарыкин Р.Е., Курбацкий А.Н.* Модель распределенных объектно-ориентированных стохастических гибридных систем // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. - 2019. – № 2. – С. 52-61.
15. *Bujorianu M.L., Lygeros J.* Toward a general theory of stochastic hybrid systems // Lecture Notes in Control and Information Science. 2006. Vol. 337. P. 3-30.
16. *Шарыкин, Р.Е., Курбацкий А.Н.* Верификация Распределенных Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем // Вестник Гродненского Государственного Университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. - 2019. – Том 9, № 2. – С. 123-133.
17. *Clavel M. [u dp.]* Maude: Specification and programming in rewriting logic // Theoretical Computer Science. – 2002. - Vol. 285, Issue 2. - P. 187–243.
18. *Sebastio, S., Vandin A.* MultiVeStA: Statistical model checking for discrete event simulators // Proceedings of the 7th International Conference on Performance
19. *Sen, K., Viswanathan M., Agha G.* On statistical model checking of stochastic systems // Lecture Notes in Computer Science. - 2005. – Vol. 3576. - P. 266–280.