

Автор:

Гравчиков Антон Вячеславович

бакалавр техн. наук, магистрант

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный

технический университет»

г. Новосибирск, Новосибирская область

DOI 10.21661/r-471797

ОБНАРУЖЕНИЕ СОБЫТИЙ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ

Аннотация: в данной статье описаны особенности разных подходов к обнаружению событий в гибридных системах. Автором добавлен алгоритм выбора шага интегрирования с учетом динамики событийной функции в пакет ИСМА, выполнено тестирование в инструментальной среде.

Ключевые слова: гибридная система, событийная функция, обнаружение событий, пакет ИСМА.

Одной из актуальных проблем в практике компьютерного моделирования систем в различных прикладных областях является наиболее корректное и эффективное проведение вычислительного эксперимента. Это относится и к гибридным системам. Для эффективного моделирования гибридной системы наряду с контролем точности, устойчивости и жесткости необходимо учитывать динамику событийной функции, определяющей возникновение событий [2, с. 54].

Можно выделить два подхода к точному обнаружению событий. Первый основан на уточнении момента возникновения события, когда оно уже произошло. Если после выполнения i -го шага интегрирования оказалось нарушенным условие нахождения системы в текущем режиме, то становится известным интервал $[t_{i-1}, t_i]$, на котором событийная функция имеет корень. Уточнить положение нуля событийной функции t^* можно, решая нелинейное уравнение $g(t) = 0$, где $g(t)$ – событийная функция, характеризующаяся предикатом $g(t) < 0$. Дальнейший расчет ведется с момента времени t^* . Но данный метод не исключает сбои. Пример фазовой траекторий, при которой не происходит обнаружения события,

приведен на рисунке 1. Тело, брошенное горизонтально, проходит сквозь препятствие, хотя должно было отскочить от поверхности.

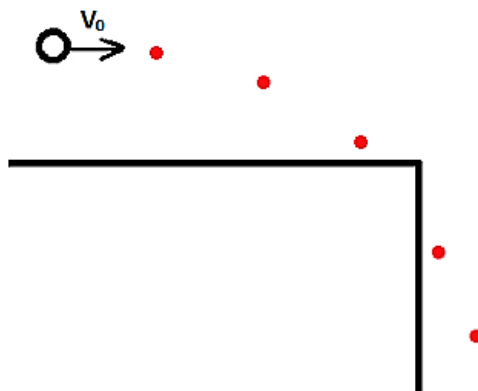


Рис. 1. Фазовая траектория, в которой стандартные методы не способны обнаружить смену режима

Второй подход основан на асимптотическом приближении к границе режима. При этом шаг интегрирования выбирается с учетом поведения событийной функции. Чем ближе к моменту возникновения события находится решение, тем меньше шаг расчета.

Режимное поведение гибридных систем представимо в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений с ограничениями:

$$\begin{aligned} y' &= f(t, x, y), x = \varphi(t, x, y), \\ pr: g(y, t) &< 0, \\ t &\in [t_0, t_k], x(t_0) = x_0, y(t_0) = y_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x \in R^{N_x}, y \in R^N, f: R \times R^N \times R^{N_x} \rightarrow R^N, \varphi: R \times R^N \times R^{N_x} \rightarrow R^{N_x}, g: R \times R^N \rightarrow R^S, S \leq N$.

Задачу (1) можно преобразовать к виду:

$$y' = f(y), z' = \frac{\partial g}{\partial y} \cdot f(y) + \frac{\partial g}{\partial t}, z = g(y, t) < 0$$

Задача решается с помощью явных методов, дающих решение следующего вида [3, с. 40]:

$$y_{n+1} = y_n + h_{n+1} \varphi_n, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots$$

Тогда событийная динамика описывается следующим выражением:

$$g_{n+1} = g(y_n + h_{n+1} \varphi_n, t_n + h_{n+1})$$

При разложении g_{n+1} в ряд Тейлора, ограничившись только линейной частью $g(y, t)$, получаем зависимость g_{n+1} от шага h_{n+1} , то есть

$$g_{n+1} = g_n + h_{n+1} \left(\frac{\partial g_n}{\partial y} \cdot \varphi_n + \frac{\partial g_n}{\partial t} \right)$$

В [1, с. 77] доказана теорема, согласно которой выбор шага выполняется по формуле:

$$h_{n+1} = (\gamma - 1) \frac{g_n}{\frac{\partial g_n}{\partial y} \cdot \varphi_n + \frac{\partial g_n}{\partial t}},$$

где $\gamma \in (0, 1)$, обеспечивает поведение событийной динамики как устойчивой линейной системы, решение которой приближается к поверхности $g(y, t) = 0$ асимптотически [3, с. 40].

Смоделируем поведение тела, брошенного горизонтально со скоростью 1м/с с высоты 200м на поверхность, имеющую обрыв на расстоянии 6.8м от проекции места броска на поверхность. Под силой тяжести оно падает, соударяется с поверхностью, снова взлетает вверх и падает уже в обрыв.

Опишем модель на языке ИСМА с учетом, что удар является абсолютно упругим, и отсутствует сила сопротивления воздуха:

```
const g = 9.81;
vx' = 0;
vy' = -g;
x' = vx;
y' = vy;
x(t0) = 0;
y(t0) = 200;
vx(t0) = 1;
vy(t0) = 0;

state fly_up (y<0 && x<=6.8) {
  set vy = -vy;
} from init, fly_down;

state fly_down (vy<0) {
} from init, fly_up;
```

График функции $y(t)$ при выключенной функциональности обнаружения событий и шаге 1с представлен на рис. 2. На графике отмечена поверхность с обрывом. Ось графика X соответствует одновременно и временной оси, и оси координаты x, так как тело брошено со скоростью 1м/с вдоль оси координаты x.

Необходимо отметить, что алгоритм проскакивает границу режима, и тело падает с обрыва без отскока.

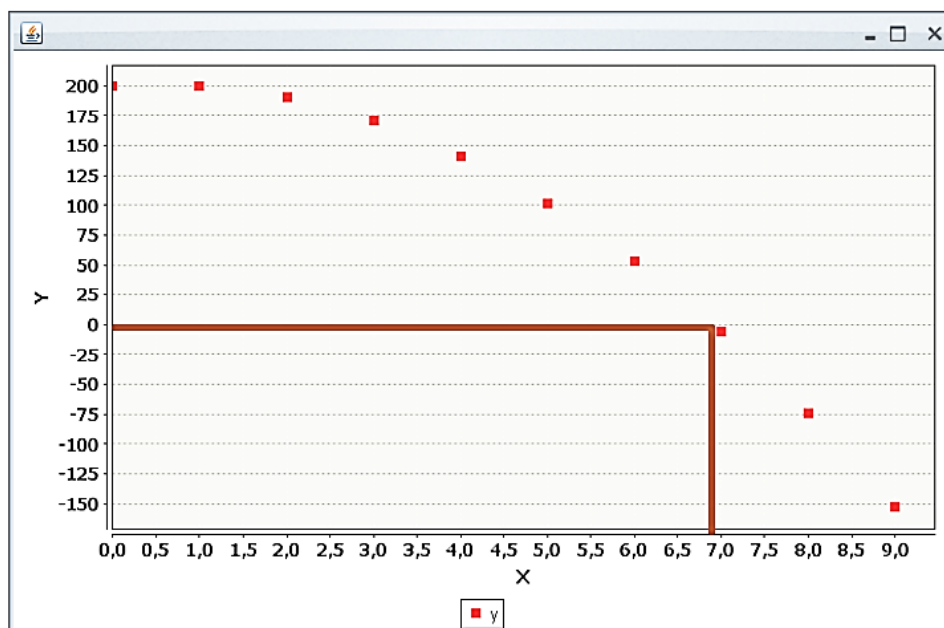


Рис. 2. Динамика модели тела, брошенного горизонтально, без алгоритма обнаружения событий

При включении алгоритма обнаружения событий с параметром $\gamma = 0.8$, максимальным шагом 1 с и минимальным – 0.001 с результат подтверждает корректность его работы (рис. 3).

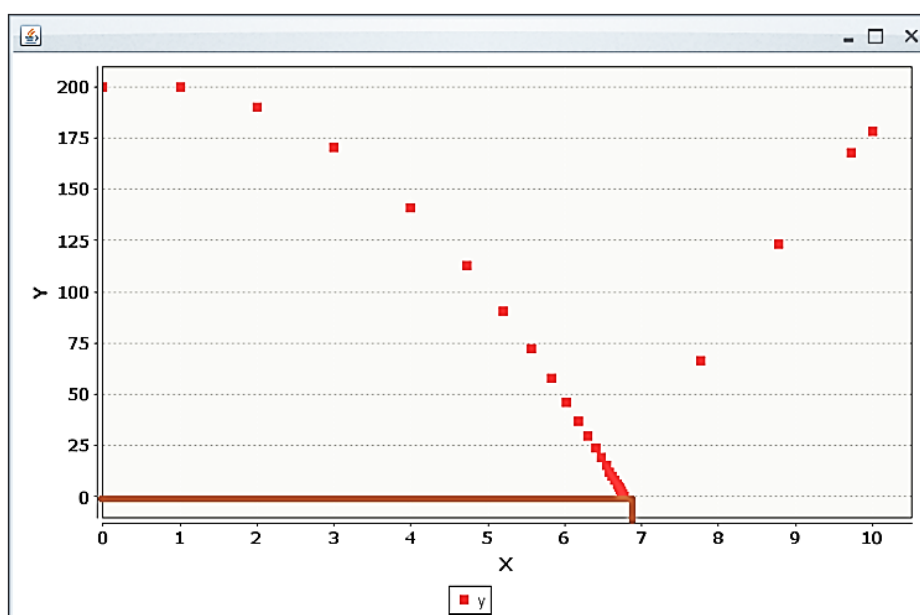


Рис. 3. Динамика модели тела, брошенного горизонтально, с алгоритмом обнаружения событий

Результатом разработки в соответствии с поставленными задачами является добавление функциональности обнаружения событий в пакет ИСМА. Новые возможности позволят пользователю наиболее точно моделировать физическое поведение гибридных систем за меньший промежуток времени.

Список литературы

1. Новиков А.Е. Численное моделирование гибридных систем явным методом третьего порядка в инструментальной среде ИСМА [Текст] / А.Е. Новиков, Е.А. Новиков, Ю.В. Шорников, Д.Н. Достовалов // Проблемы информатики. – 2010. – №3 (7). – С. 73–80.
2. Шорников Ю.В. Математическое и программное обеспечение компьютерного моделирования гибридных систем / Ю.В. Шорников, Д.Н. Достовалов, А.В. Бессонов. // Программные системы: теория и приложения. – 2012. – №5 (14). – С. 45–58.
3. Шорников Ю.В. Моделирование жестких гибридных систем с односторонними событиями в среде ИСМА / Ю.В. Шорников, Д.Н. Достовалов // Компьютерное моделирование 2012: Труды международного семинара. – СПб.: Политехнический университет, 2012. – С. 36–41.