АВДЕЕВ Степан Александрович - *аспирант кафедры физики и информационных систем ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет» («КубГУ»)*
Адрес: 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, ФТФ
e-mail: stepan.avdeev@pochta.ru

БОГАТОВ Николай Маркович - *доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и информационных систем ФГБОУ ВПО «КубГУ», действительный член АИН РФ им. А.М. Прохорова*
Адрес: 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, ФТФ
e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ КРИТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОГО НЕОДНОРОДНОГО КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА

Введение

Процессы различного свойства, происходящие в природе, обществе, экономике и технике, имеют нестационарный и нелинейный характер. Одно из проявлений самоорганизации в этих процессах - это самоподдерживающиеся автономные волны, называемые автоволнами. Для прогнозирования возникновения и последствий распространения автоволн используются методы теории клеточных автоматов [1-4]. Преимуществами таких моделей перед классическими моделями на основе дифференциальных уравнений [5-7] являются более простая адаптация к задаче и меньшая вычислительная сложность, позволяющая производить моделирование в реальном времени. Адаптивные неоднородные автоматы используются для анализа и моделирования различных процессов: в биологии, транспорте, энергетике, распознавании образов и изображений, криптографии [8-12].

Существующие методы клеточных автоматов имеют свои недостатки, не позволяющие применить их к задачам распространения вещества и энергии в активной возбудимой среде или накладывающие при этом определенные ограничения на функционирование информационной системы. Например, отсутствие изотропности [1], невозможность описания специфичных конфигураций неоднородности среды и особенностей «неконсервативных» сил, затухающих или усиливающихся по мере удаления от источника в зависимости от пройденной траектории [1-4].

Создание информационных систем в различных предметных областях (энергетике, транспорте, бизнесе), позволяющих прогнозировать появление периодически и непериодически возникающих критических ситуаций, поможет своевременно предотвратить или минимизировать их последствия.

Цель работы. Построение теории прогнозирования автоволновых процессов, результат действия которых зависит от траектории распространения, и связанных с ними критических ситуаций.

Описание сложных систем с помощью адаптивного неоднородного клеточного автомата

Элементы сложной системы взаимодействуют между собой в процессе ее функционирования. Каждому элементу поставим в соответствие определенную клетку автомата. Способность элементов системы участвовать в переносе вещества или энергии будем называть потенциалом действия. Построим модель, позволяющую учитывать различную длительность потенциала действия в разных элементах системы. Одним из следствий различий в длительности потенциала действия в разных элементах системы является изменение направления распространения потока вещества или энергии по отношению к заданному направлению. Решение этой задачи предполагает использование различных функций перехода δ в различных клетках автомата.

Модели с неоднородной длительностью потенциала действия разрабатывались для описания кардиологических сигналов [13, 14]. Различная длительность потенциала действия в разных клетках автомата достигается добавлением в клеточный автомат элемента *T*, представляющего собой функцию длительности потенциала действия, от которого будет зависеть функция перехода.

Неоднородный клеточный автомат - это конечное множество *M* элементов (клеток) m_{ij}, таких что

$$M \equiv (B, \Omega, Q, q, q_0, \omega, \delta, T),$$
$$\Omega \subset N,\ Q \subset N^2,\ q, q_0 \in Q,$$
$$\omega(q): Q^{|B|} \to \Omega,$$
$$\delta(\omega, q, T): \Omega \times Q \to Q,$$

N - множество натуральных чисел;

B - множество соседей, метод допускает использование любой необходимой топологии, в том числе наиболее распространенной прямоугольной;

Ω - область значений функции входной переменной ω;

q - состояние клетки;

q_0 - начальное состояние клетки;

Q - множество возможных состояний клетки, а также область значения функции перехода δ;

$\omega(q)$ - функция входной переменной, отображающая состояния q_j клеток-соседей, членов множества *B*, в множество возможных значений входной переменной Ω;

$\delta(\omega, q, T)$ - функция перехода конечного автомата, определяющая новое состояние клетки, в зависимости от текущего состояния и значения функции входной переменной, правило зависит также от параметра *T*, заданного отдельно для каждой клетки автомата.

Таким образом, для неоднородного клеточного автомата функция перехода δ, топология *B* или множество состояний *Q* могут отличаться для разных клеток.

Адаптивный неоднородный клеточный автомат - это неоднородный клеточный автомат, распределение неоднородности которого зависит от параметров, изменяющихся в результате его работы.

Неоднородный клеточный автомат с аккумулятивным распределением

При описании процессов, результат действия которых зависит от траектории, используется адаптивный неоднородный клеточный автомат, функция перехода которого зависит от дополнительной переменной «неоднородности», значение которой пересчитывается при каждой итерации с помощью адаптивной функции в зависимости от предыдущих значений этой переменной в окрестности клетки.

Предлагается адаптивная функция специального вида, называемая далее аккумулятивной функцией, являющаяся решением следующего нелинейного интегрального уравнения Вольтера:

$$g(x,y,t) = \int^{t} u(x,y,t)\eta(g(x,y,s)) \cdot$$
$$\cdot \left(k(x,y,s)s(x,y,s) + \alpha\right)ds + g_0(x,y),$$

x, y - пространственные координаты, *t* - координата времени, $t \in [t_0, +\infty)$;

u(x, y, t) - параметрическая функция, вид которой определяется спецификой задачи;

η - инверсированный индикатор равенства нулю,

$$\eta(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases};$$

k(x, y, t) - нормировочная функция, дающая при умножении на *s(x, y, t)* среднее по ненулевым значениям,

$$k(x,y,t) = \frac{1}{\int_{y-a}^{y+a}\int_{x-a}^{x+a} \rho(g(p,q,t))dqdp + \beta};$$

ρ - индикатор равенства нулю,

$$\rho(x) = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ 1, & x \neq 0 \end{cases};$$

β - малое положительное значение, предотвращающее неопределенность функции *k(x, y, t)*, в случаях, когда подынтегральное выражение равно нулю, $0 < \beta << 1$;

s(x, y, t) - интегральная сумма значений аккумулятивной функции по окрестности точки *(x, y)*,

$$s(x,y,t) = \int_{y-a}^{y+a}\int_{x-a}^{x+a} g(p,q,t)dqdp;$$

$g_0(x, y)$ - функция начальных условий,

$$g_0(x,y) = \begin{cases} g_{\min}, & (x,y) \in X_0 \times Y_0 \\ 0, & (x,y) \notin X_0 \times Y_0 \end{cases},$$

g_{min} - положительное число, определяющее минимальное значение аккумулятивной функции ($g_{min} > 0$), совокупность множеств X_0 и Y_0 представляет собой область инициации;

α - приращение накопления ($\alpha > 0$), параметр, определяющий скорость возрастания аккумулятивной функции.

Аккумулятивная функция имеет следующие преимущества по сравнению с функциями памяти клеточных автоматов [15, 12]: 1 - предоставляет возможность адаптивного ограничения верхнего предела интегрирования в зависимости от неоднородности аккумулятивной функции в точке *(x, y)* при помощи индикаторной функции η; 2 - учитывает не только состояние текущей ячейки, но и состояния ячеек, относящихся к ее окрестности, и использует запоминание с приращением. Свойства 1, 2 в совокупности обеспечивают пространственное возрастание функции с градиентом, направленным от источника, заданного функцией $g_0(x, y)$.

Другим важным свойством аккумулятивной функции является ее ограниченность сверху, что позволяет применять ее предельные значения при t, стремящемся к бесконечности в клеточных автоматах в качестве смоделированных значений сил, отвечающих за затухание или усиление.

Значения аккумулятивной функции можно определить посредством численного решения дифференциального уравнения, соответствующего интегральному уравнению Вольтера:

$$\frac{\partial g(x,y,t)}{\partial t} = u(x,y,t)\eta(g(x,y,t))\cdot$$
$$\cdot\left(k(x,y,t)s(x,y,t)+\alpha\right),$$

с начальным условием

$g(x, y, t_O) = g_O(x, y)$.

В рамках метода клеточного автомата для получения качественных закономерностей, не требующих высокой точности численной процедуры, для решения дифференциального уравнения достаточно использовать метод Эйлера первого порядка. Расчет функций $k(x, y, t)$ и $s(x, y, t)$ при этом может быть произведен численным интегрированием методом прямоугольников:

$$k(x,y,t) = \frac{1}{h^2 \sum_{j=y-a}^{y+a} \sum_{i=x-a}^{x+a} \rho(g(i,j,t)) + \beta},$$

$$s(x,y,t) = h^2 \sum_{j=y-a}^{y+a} \sum_{i=x-a}^{x+a} g(i,j,t),$$

где h - шаг сетки клеточного автомата.

Для моделирования активной возбудимой среды с учетом «неконсервативных» явлений изменения длительности взаимодействия, явлений активации и затухания с учетом заданной неоднородности, связанной со структурными повреждениями, предлагается усовершенствованный адаптивный неоднородный клеточный автомат с модифицированными уравнениями адаптации $\gamma(\omega, g, q)$ и перехода состояния $\delta(\omega, q, g, r_g)$:

$$M \equiv (B,\Omega,Q,G,q,q_0,g,g_0,\delta,\gamma,r_g,\varphi),$$

$$\Omega \subset N,\ Q \subset N^2,\ q,q_0 \in Q,$$

$$q \equiv (u,v,t,z) \in Q \subset N^4,$$

$$\omega(q): Q^{|B|} \to \Omega \subset N^2,$$

$$g \equiv (\Delta,a,p,h) \in G \subset Z^4,\ g_0 \in G,$$

$$\delta(\omega,q,g,r_g): \Omega \times Q \times G \times Z \to Q,$$

$$\gamma(\omega,g,q): \Omega \times G^{|B|} \to G,$$

$$r_g(g): G^{|B|} \to Z,$$

B - множество соседей, например, прямоугольная сетка и окрестность Мура, то есть 8 ячеек, имеющих общую вершину с данной на прямоугольной сетке, и 16 ячеек, имеющих общую вершину хотя бы с одной из этих 8 ячеек;

ω - функция входной переменной, возвращает два значения, ω_a - средний уровень возбуждения активации в окрестности клетки и ω_b - средний уровень возбуждения реактивации в окрестности клетки,

$$\omega(\{q_j\}) = \left(\sum_j u_j\Big|_{z_j=1},\quad \sum_j u_j\Big|_{z_j=3} \right),$$

функция определена на множестве состояний клеток, входящих в множество соседей B, индекс j в суммировании нумерует клетки этого множества;

q - вектор состояния, заданный четырьмя параметрами u, v, t, z:

u - уровень возбуждения;

v - уровень восстановления, отвечает за длительность фазы восстановления возбудимой среды;

t - таймер задержки реактивации, определяет увеличение длительности потенциала действия $(t > 0)$, учитывает разницу потенциала действия в разных областях модели, в зависимости от параметра неоднородности p;

z - индикатор состояния, показывает, какой из процессов, деактивации или реактивации, протекает в настоящий момент времени;

φ - дополнительная функция для преобразования состояний q ячеек клеточного автомата в значения потенциала действия, область значений функции φ входит в множество вещественных чисел;

g - вектор неоднородности, состоящий из четырех параметров Δ, a, p, h:

Δ - параметр, обеспечивающий изотропность или неизотропность;

a - уровень структурных нарушений, выраженный численно, например, время задержки процессов реактивации в данной клетке модели; адаптация этого параметра может описывать процессы деградации или восстановления поврежденных областей,

p - параметр, моделирующий явления уменьшения длительности реактивации в зависимости от расстояния, пройденного от источника деактивации; данное явление представляет собой пример «неконсервативного» явления, так как усиление при распространении возбуждения деактивации может происходить по криволинейной траектории при распространении в среде, имеющей сложную форму, поэтому необходимо использовать управляемую аккумулятивную функцию адаптации;

h - параметр, моделирующий явления уменьшения длительности реактивации в зависимости от расстояния, пройденного от области начала реактивации; данное явление также представляет собой пример «неконсервативного» явления, так как распространение возбуждения реактивации может происходить по криволинейной траектории, в результате наличия препятствий в виде возбужденных ячеек или участков со структурными нарушениями, поэтому также требует использования управляемой аккумулятивной функции адаптации;

$\gamma(\omega, \{g_j\}, q)$ - функция адаптации переменной неоднородности, функция передает значение параметров Δ, a на следующую итерацию, параметры p и h адаптируются на каждой итерации с помощью построенных аккумулятивных функций.

Клетки, в которых начинается деактивация и реактивация, определяются адаптивно с помощью соответствующего управляющего члена u_p или u_h:

$$u_p(\omega(t), \Delta) = \begin{cases} 1, \omega_a(t) > \Delta \\ 0, \omega_a(t) < \Delta \end{cases},$$

$$u_h(\omega(t), \Delta) = \begin{cases} 1, \omega_b(t) > \Delta \\ 0, \omega_b(t) < \Delta \end{cases},$$

эти условия аналогичны условиям передачи возбуждения деактивации и реактивации соответственно между клетками модели, управляющий член такого типа позволяет построить аккумулятивную функцию для адаптации значений переменных неоднородности p и h с учетом пройденного расстояния от источника деактивации и области начала реактивации соответственно.

В адаптивной функции $\gamma(\omega,\{g_j\},z)$ определены условия сброса значений адаптационной функции для перехода на следующую итерацию. Итерация представляет собой следующий цикл активации и реактивации от некоторого источника, соответственно при этом переопределяется также значение g_0 для отражения новой позиции источника. Сброс происходит отдельно для каждой клетки при достижении переменной состояния z конечного значения.

Значение $0 < z \leq 2$ означает фазы деактивации, после их завершения параметр p больше не используется и может быть обнулен. Аналогично значение $z = 3$ означает реактивацию, во время которой адаптируется значение h, а $z = 4$ означает сброс состояния, при котором происходит сброс h и переход к следующей итерации деактивации-реактивации.

Еще одним новым компонентом модели структурных нарушений является функция взаимосвязи $r_g(g)$, принимающая на вход значение переменной неоднородности g в клетках-соседях и возвращающая значение воздействия деактивации в окрестности данной клетки на скорость реактивации, связанную с увеличением длительности воздействия:

$$r_p(g) = p_r \sum_j \rho\left(p_{i,j}(t)\right),$$

где p_r - положительное число, характеризующее степень влияния процессов активации на длительность реактивации $(p_r > 0)$.

$\delta(\omega,q,g,r_g)$ - функция перехода состояний содержит требуемое постановкой задачи количество адаптируемых параметров неоднородности, моделируя взаимодействие элементов системы. Следует отметить, что такого типа модель невозможно построить в рамках математического аппарата клеточных автоматов с памятью [12], так как память в них адаптируется в соответствии с состоянием q ячеек и подразумевает использование только одной переменной неоднородности.

Заключение

В данной работе предложена теория развития самоподдерживающихся автоволновых процессов, основанная на новом классе неоднородных клеточных автоматов, использующих специальные аккумулятивные функции для распределения неоднородности. Эта теория предназначена для прогностического модуля информационной системы, описывающего автоволновые процессы распространения вещества и энергии, результат действия которых зависит от траектории распространения в сложных системах с учетом их структурных нарушений.

Информационная система позволит прогнозировать возникновение периодических и непериодических нарушений функционирования сложных систем, включая критические ситуации прекращения их деятельности.

Разработанная теория может быть использована для моделирования в реальном времени большого многообразия процессов, в биологии, транспорте, энергетике, экономике, инфокоммуникационных системах.

Литература:

1. Moe G.K., Rheinboldt W.C., Abildskov J.A. A computer model of atrial fibrillation // American Heart Journal. - 1964. - V. 67. - № 2. - P. 200-220.

2. Pourhasanzade F., Sabzpoushan S.H. A new cellular automata model of cardiac action potential propagation based on summation of excited neighbors // World Academy of Science, Engineering and Technology. - 2010. - № 44. - P. 917-921.

3. Gerhardt M., Schuster H., Tyson J.J. A cellular automaton model of excitable media including curvature and dispersion // Science. - 1990. - № 247. - P. 1563-1566.

4. Markus M., Hess B. Isotropic cellular automaton for modeling excitable media // Nature. - 1990. - V. 347. - P. 56-58.

5. Weimar J.R., Tyson J.J, Watson L.T. Diffusion and wave propagation in cellular automaton models of excitable media // Physica D. - 1991. - V. 55. - P. 309-327.

6. FitzHugh R. Mathematical models of threshold phenomena in the nerve membrane // Bull. Math. Biophysics. - 1955. - V. 17. - № 17. - P. 257-278.

7. Aliev R.R., Panfilov A.V. A simple two-variable model of cardiac excitation // Chaos, Solitons and Fractals. 1996. - 7(3). - P. 293-301.

8. Indekeu J.O., Giuraniuc C.V. Cellular automaton for bacterial towers // Physica A: Statistical and Theoretical Physics. - 2004. - № 336. - P. 14-26.

9. Quadir F., Perr M.A., Khan K.A. Cellular automata based identification and removal of impulsive noise from corrupted images // Journal of Global Research in Computer Science. - 2012. - V. 3. - № 4. - P. 17-20.

10. Medernach D., Kowaliw T., Ryan C., Doursat R. Long-term evolutionary dynamics in heterogenous cellular automata // Proceeding of the 15th annual conference on genetic and evolutionary computational conference. - 2013. - P. 231-238.

11. Sapin E., Bull L., Adamatzky A. A Genetic approach to search for glider guns in cellular automata // IEEE Congress on evolutionary computation. - 2007. - P. 2456-2462.

12. Seck-Tuoh-Mora J.C., Martinez G.J., Alonso-Sanz R., Hernandez-Romero N. Invertible behavior in elementary cellular automata with memory // Information Sciences. - 2012. - V. 199. - № 4. - P. 125-132.

13. Jiang Z., Mangharam R. Modelling cardiac pacemaker malfunctions with the Virtual Heart Model // Conf Proc IEEE Med. Biol. Soc. - 2011. - P. 263-266.

14. С.Ю. Андреев, Р.Е. Баталов, С.В. Попов, В.А. Кочегуров, Ф.А. Вадутова. Интраоперационное моделирование возбуждения миокарда предсердий // Известия Томского политехнического университета. - 2010. - Т. 317. - № 5. - С. 189-194.

15. Alonso-Sanz R., Martin M. Elementary cellular automata with memory // Complex Systems. - 2003. - № 14. - P. 99-126.

НАША ИНФОРМАЦИЯ

Шестой российский форум по управлению интернетом состоится 7 апреля 2015 г. в Москве. Форум организован Координационным центром национального домена сети Интернет и Техническим центром Интернет при поддержке ICANN и РАЭК.

Центральной темой Форума станет обсуждение многообразия форм, которые принимает государственная политика разных стран в сфере управления интернетом. Участники Форума обсудят вопросы кибербезопасности, защиты частной жизни в сети, а также перспективы развития новых доменов верхнего уровня. К откровенному разговору на эти темы будут привлечены ведущие эксперты - представители отрасли, государства, науки и бизнеса.

Шестой российский форум по управлению интернетом пройдет в определяющий для глобального Интернет-сообщества момент. В преддверии Всемирной встречи на высшем уровне по вопросам информационного общества, которая состоится в конце 2015 г., стала очевидной необходимость усиления внимания государства к проблеме управления интернетом и национальными сегментами сети. Одновременно представители заинтересованных сторон - государства, технического сообщества, бизнеса и гражданского общества - ищут новые пути решения существующих вызовов в сфере безопасности, укрепления доверия в сети, защиты прав человека, развития цифровой экономики. В пространстве вариантов развития системы управления интернетом эти проблемы требуют поиска консенсуса и взаимно согласованных подходов.

Управление интернетом можно рассматривать с точки зрения двух подходов. В соответствии с узким подходом, управление интернетом представляет собой технологическую координацию элементов интернета, в том числе управление системой доменных имен и распределением IP-адресов, а также выработку и применение протоколов и стандартов. В соответствии с широким подходом, учитывающим экономические, политические и социокультурные аспекты данного процесса, управление интернетом - это разработка и применение правительствами, частным сектором и гражданским обществом общих принципов, норм, правил, программ и процедур принятия решений, регулирующих эволюцию и применение интернета.

Организатор Форума - АНО «Координационный центр национального домена сети Интернет».

Телефон: (499) 254-88-94 **Факс:** (499) 254-89-63

E-mail: rigf@cctld.ru http://rigf.ru/