

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 519.179.2:004.94

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_1_7

А.О. Аристов

АНАСТОМОЗ В КВАЗИКЛЕТОЧНЫХ СЕТЯХ И ПРОБЛЕМА АДЕКВАТНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Москва, Россия

Рассмотрены вопросы преобразования теоретико-графовых моделей потоковых систем в различных предметных интерпретациях в модели на основе квазиклеточных сетей. Указанное преобразование предполагает переход от макромоделей на микроуровень. В ходе преобразования обозначено явление, нарушающее адекватность преобразования – анастомоз. Он предполагает соседство областей пространства, относящихся к структурам макромоделей, не имеющим фактического соседства. Для решения указанной проблемы применяется выявление дополнительных координат областей пространства на основе реберной раскраски исходных теоретико-графовых моделей. Приведены примеры практического применения решения проблемы анастомоза на основе моделей транспортных систем.

Ключевые слова: сеть, поток, моделирование, микромодель, макромодель, квазиклеточная сеть, анастомоз, раскраска графа.

В работах [1-3] рассматривается особый тип дискретных структур – квазиклеточные сети. Они предназначены для моделирования распространения потоков в различных предметных интерпретациях, где поток рассматривается как направленное распространение некоторых объектов (потокообразующих) в пространстве. Квазиклеточная сеть – динамическая дискретная структура, состоящая из областей пространства (клеток), в каждой из которых находится единица потока, переходящая в соседние клетки с течением времени. Такие сети рассматриваются как один из подходов к переходу между макро- и микроуровнем моделирования [2]. На макроуровне, как правило, анализируют потоковые системы, пространство распространения потока в которых представляется в виде графа [4-6]. Таким образом, одним из наиболее интуитивно понятных способов синтеза квазиклеточной сети является метод базового графа [1], где на основе принципов визуализации графа берутся пространственные координаты вершин, а клетки строятся вдоль ребер графа. Каждая клетка синтезирована на элементе графа – ребре или вершине (рис. 1). Соответственно, ребро и вершину по отношению к клетке назовем базовым элементом графа.

Если клетки синтезированы на одном базовом ребре или на вершине, инцидентной базовому ребру между вершинами, рассматривается выполнение условия соседства. Вместе с тем, в ряде случаев соседними оказываются клетки, синтезированные на ребрах инцидентных одной вершине (вблизи этой вершины) и синтезированные на ребрах, пересекающихся не в вершинах. Подобные случаи обладают некоторой аналогией с биологическим термином «анастомоз», обозначающим соединение (соустье), особенно между сосудами, полыми органами и полостями, которые обычно отделены друг от друга или разветвляются [3, 7]. Таким образом, анастомоз в квазиклеточных сетях рассматривается как бионический термин. Само это явление представляет проблему с точки зрения синтеза моделей, нарушающую в частности ее адекватность при переходе от макро- к микроуровню [3]. В настоящей работе рассматривается проблема анастомоза в квазиклеточных сетях и ее решение.

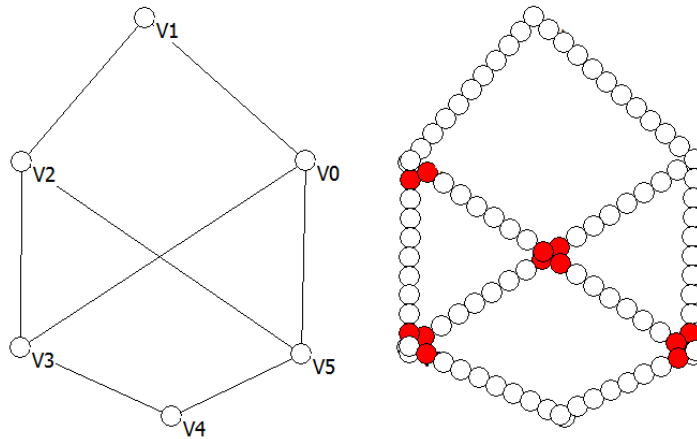


Рис. 1. Метод базового графа. Анастомоз в квазиклеточных сетях

Рассматривая типичные ситуации, приведенные на рис. 1, нетрудно видеть, что анастомоз возникает вблизи вершин базового графа, а также в местах пересечения ребер. Учитывая, что реберный анастомоз приводит к нарушению циркуляции в соответствии со структурой базового графа, следует ввести соответствующие ограничения, предполагающие, что передача состояния происходит только между клетками, которым соответствует одно и то же базовое ребро базового графа. Также следует отметить, что переход состояния к клеткам, построенным на основе другого ребра базового графа, осуществляется при передаче состояния из клеток, для которых базовым элементом является вершина графа, т.е., фактически базовой для такой клетки считаем вершину базового графа, в которой сходятся ребра (1):

$$\begin{cases} Q_u = (x_u, y_u, S_u) \equiv \begin{cases} Q_u = (x_u, y_u, S_u) \\ Q_u \in (V_{ia}, V_{ib}) \\ Q_u \in (V_{ia}, V_{ic}) \\ Q_u \in (V_{ia}, V_{id}) \\ \dots \end{cases} \\ \left. \begin{matrix} Q_u \in (V_{ia}, V_{ib}) \\ Q_u \in (V_{ia}, V_{ic}) \\ Q_u \in (V_{ia}, V_{id}) \\ \dots \end{matrix} \right\} Q_u \in V_{ia} \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, для ограничения циркуляции в квазиклеточных сетях с анастомозом следует ввести дополнительные условия передачи состояния между соседними клетками $Q_u \rightarrow Q_v$ (2):

$$\begin{cases} Q_u = (x_u, y_u, S_u) \\ Q_v = (x_v, y_v, S_v) \\ \left[\begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} Q_u \in (V_{ia}, V_{ib}) \\ Q_v \in (V_{ic}, V_{id}) \end{matrix} \right. \\ \left\{ \begin{matrix} Q_u \in (V_{ia}, V_{ib}) \\ Q_v \in V_{ia} \end{matrix} \right. \end{matrix} \right] \end{cases} \quad (2)$$

Следует отметить, что машинная реализация проверки условий (2) требует организации полного перебора множеств и установления базовых элементов для всех клеток. Также серьезной проблемой является значительный объем памяти, требуемой для кодирования базовых элементов, которые будут содержаться в качестве компонентов клетки (3):

$$Q_i = (B_i, C_i, S_i), \quad (3)$$

где B_i – набор неизменных параметров клетки (координат), C_i – переменные параметры клетки, изменяемые в ходе прохождения потока, S_i – набор параметров потокообразующего микрообъекта, находящегося в клетке.

Информационный объем (в битах) компоненты, отвечающий за базовый элемент вычисляется как (4):

$$I_B = \lceil \log_2 N \rceil \quad (4)$$

где N – количество элементов в базовом графе $G = \langle V, U \rangle$, $\lceil \dots \rceil$ – округление в сторону большего целого. Тогда (5):

$$N = |V| + |U| \quad (5)$$

Для циркуляции, согласно условиям (2), фактически не имеет значения, какой элемент является базовым для конкретной клетки, но необходимы сведения о том, нарушает ли переход состояния между клетками структуру базового графа. По условиям (2) допустимы переходы между клетками, синтезированными на основе различных базовых элементов, а также между клеткой, синтезированной на основе вершины базового графа и клеткой, синтезированной на прилегающем ребре. Приведенные условия представим в виде графа G' , каждой вершине которого взаимно однозначно соответствует ребро базового графа, а ребро моделирует запрет на переход состояния между клетками, синтезированными на базе ребер исходного базового графа. Тогда проверку условия перехода состояния между клетками сведем к раскраске рассматриваемого графа (рис. 2).

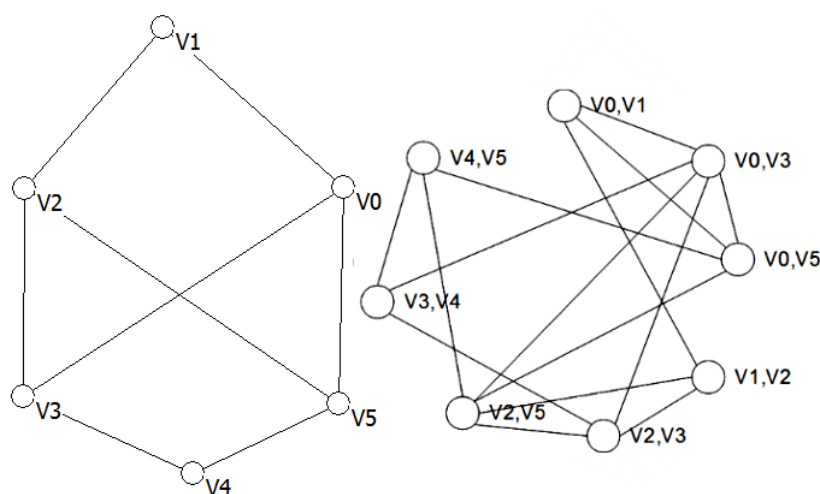


Рис. 2. Базовый граф и граф G'

Необходимо отметить, что ребра, между которыми наблюдается пересечение не в вершинах, также отображаются в рассматриваемом графе (рис. 2). Таким образом, ограничение циркуляции сводится к раскраске ребер базового графа. Дополнительным условием считается то, что ребра, пересекающиеся не в вершинах, не должны быть соцветными. Пусть вершины $V_{ia}, V_{ib}, V_{ic}, V_{id}$, образующие ребра (V_{ia}, V_{ib}) и (V_{ic}, V_{id}) , имеют соответственно координаты $(x_{ia}, y_{ia}), (x_{ib}, y_{ib}), (x_{ic}, y_{ic}), (x_{id}, y_{id})$. Тогда прямые, на которых отложены указанные ребра, задаются уравнениями [1] (6):

$$\begin{cases} y = \frac{y_{ib} - y_{ia}}{x_{ib} - x_{ia}} \cdot x + \frac{x_{ib}y_{ia} - x_{ia}y_{ib}}{x_{ib} - x_{ia}} \\ y = \frac{y_{id} - y_{ic}}{x_{id} - x_{ic}} \cdot x + \frac{x_{id}y_{ic} - x_{ic}y_{id}}{x_{id} - x_{ic}} \end{cases} \quad (6)$$

Предполагается, что в графе G' вводится ребро между вершинами, соответствующими (V_{ia}, V_{ib}) и (V_{ic}, V_{id}) , в том случае, если система (6) имеет решение в точке (x, y) , попадающей в полигон, ограниченный $(x_{ia}, y_{ia}), (x_{ib}, y_{ib}), (x_{ic}, y_{ic}), (x_{id}, y_{id})$, т.е., решение удовлетворяет (7):

$$\begin{cases} \min(x_{ia}, x_{ib}) \leq x \leq \max(x_{ia}, x_{ib}) \\ \min(y_{ia}, y_{ib}) \leq y \leq \max(y_{ia}, y_{ib}) \\ \min(x_{ic}, x_{id}) \leq x \leq \max(x_{ic}, x_{id}) \\ \min(y_{ic}, y_{id}) \leq y \leq \max(y_{ic}, y_{id}) \end{cases} \quad (7)$$

Кроме того, следует обратить внимание, что каждая клетка приобретает определенный цвет в соответствии с цветом базового элемента. При этом вершины базового графа позволяют синтезировать клетки, переход из которых возможен в нескольких направлениях без каких-либо ограничений. Тогда считаем, что все такие вершины могут быть окрашены в один отдельный цвет. Таким образом, раскраска ребер базового графа позволяет решить проблему анастомоза, возникающего вблизи вершин базового графа при синтезе структуры квазиклеточной сети. При этом каждая клетка приобретает цвет (рис. 3), т.е., в состав вектора B_i входит составляющая, определяющая цвет клетки (8):

$$B_i = (x_i, y_i, col_i), \quad (8)$$

где $col_i \in (col^{(0)}, col^{(1)}, col^{(2)}, \dots, col^{(h)})$, h – хроматический класс базового графа [5], $col^{(0)}$ – цвет клеток, сформированных на основе вершин базового графа.

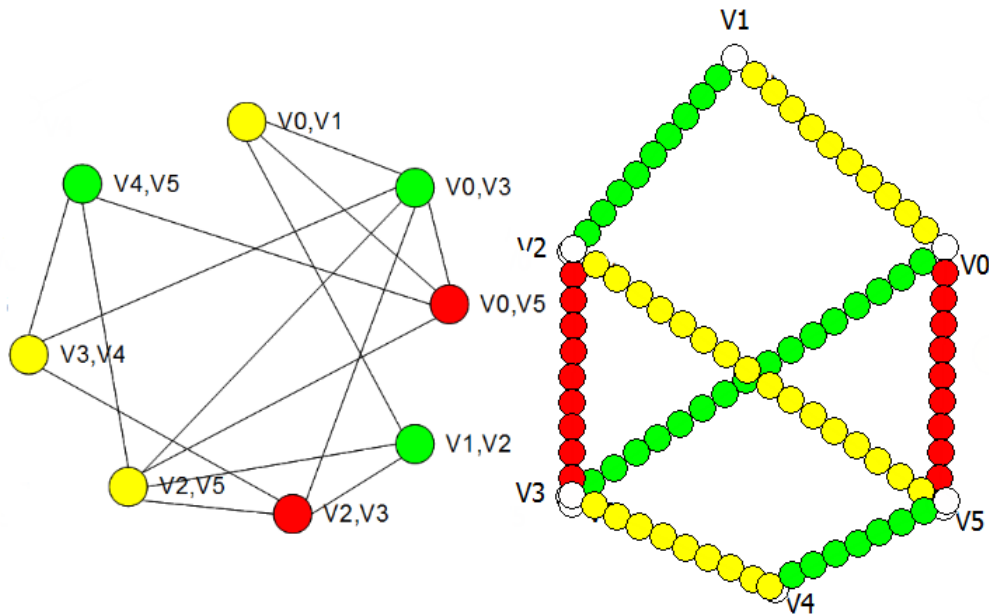


Рис. 3. Назначение красок элементам квазиклеточной сети

Тогда условие (2) примет вид (9):

$$\begin{cases} Q_u = (x_u, y_u, col^{(u)}, S_u) \\ Q_v = (x_v, y_v, col^{(v)}, S_v) \\ \begin{cases} col^{(u)} = col^{(v)} \\ col^{(u)} = col^{(0)} \\ col^{(v)} = col^{(0)} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

Отдельно следует остановиться на проблеме анастомоза в квазиклеточных сетях при их синтезе методом генерирующей фишки. Выше было отмечено, что анастомоз при генерации достаточно распространен. Чаще всего, при синтезе методом генерирующей фишки требуется сформировать определенное количество клеток. При синтезе квазиклеточной сети без анастомоза достаточно часто возникает тупик генерирующей фишки. Таким образом, следует решить проблему тупика. Фактически тупик предполагает невозможность генерации клеток, для которых выполняется условие на i -й итерации синтеза (10):

$$\sqrt{(x_{ci} - x_{i-1})^2 + (y_{ci} - y_{i-1})^2} \leq 4R^2. \quad (10)$$

В такой ситуации предполагается, что продолжение синтеза клеток будет осуществляться от другой базовой клетки, т.е., фактически генерирующая фишка вернется в координаты ранее сформированных клеток. Пусть генерирующая фишка сформировала клетку $Q_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, S_{i-1})$. Генерирующая фишка перемещается в координаты (x_{ci}, y_{ci}) , для которых (11):

$$\sqrt{(x_{ci} - x_{i-1})^2 + (y_{ci} - y_{i-1})^2} = 4R^2. \quad (11)$$

При наличии клеток $Q_k = (x_k, y_k, S_k)$ при $k \neq i-1$ возникает анастомоз (12):

$$\sqrt{(x_{ci} - x_k)^2 + (y_{ci} - y_k)^2} < 4R^2. \quad (12)$$

При невозможности генерации других клеток, не соответствующих условию (12), возникает тупик. Следует обратить внимание, что координаты генератора удовлетворяют соотношениям (13):

$$\begin{cases} x_{ci} = x_{i-1} + R \cdot \cos \alpha, \\ y_{ci} = y_{i-1} + R \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (13)$$

где α – угол, определяющий направление сдвига генерирующей фишки на каждой итерации синтеза. Тогда тупик генерирующей фишки можно описать как (14):

$$\begin{cases} x_{ci} = x_{i-1} + R \cdot \cos \alpha \\ y_{ci} = y_{i-1} + R \cdot \sin \alpha \\ \forall \alpha : \sqrt{(x_{ci} - x_k)^2 + (y_{ci} - y_k)^2} < 4R^2 \\ k \neq i-1 \end{cases} \quad (14)$$

Тогда при возникновении тупика (14) следует продолжить синтез квазиклеточной сети от клетки, для которой $Q_k = (x_k, y_k, S_k)$ для которой выполняется условие (15):

$$\begin{cases} x_{ci} = x_k \\ y_{ci} = y_k \end{cases} \quad (15)$$

Следует обратить внимание, что при предотвращении анастомоза, в соответствии с условиями (12) и (14), в квазиклеточной сети остается тупик. В зависимости от предметных интерпретаций, устанавливаем критерии выбора конкретной клетки $Q_k = (x_k, y_k, S_k)$, от которой будет продолжена генерация квазиклеточной сети. В частности, существуют задачи, допускающие анастомоз, однако при необходимости выбора клеток для последующего синтеза методом генерирующей фишки, целесообразно минимизировать или максимизировать пересечение клетки, базовой для которой является тупик, при анастомозе. При минимизации пересечения предполагается, что из всех клеток, отвечающих условию (14), генерация согласно (15) будет продолжена из клетки, для которой (16):

$$\max_{Q_k} \sqrt{(x_{ci} - x_k)^2 + (y_{ci} - y_k)^2}. \quad (16)$$

Максимальное пересечение предполагает сокращение расстояния между клетками (17):

$$\min_{Q_k} \sqrt{(x_{ci} - x_k)^2 + (y_{ci} - y_k)^2}. \quad (17)$$

Поскольку предполагается анастомоз, то до выполнения (15) происходит формирование клетки $Q_k = (x_{ci}, y_{ci}, S_{ci})$.

Таким образом, при синтезе и циркуляции квазиклеточных сетей важную роль играет проблема анастомоза, предполагающая пересечения клеток, нарушающие преобразование дискретных структур в квазиклеточные сети. Также следует отметить, что решение ряда проблем, тесно связанных с анастомозом, существенно влияет на структуру синтезируемой квазиклеточной сети и циркуляцию в ней.

Областью применения рассмотренного подхода к решению проблемы анастомоза в квазиклеточных сетях является моделирование и представление моделей потоковых систем в ряде ситуаций, где при синтезе методом базового графа наблюдается нарушение адекватности модели. В частности, такая ситуация наблюдается при моделировании многоярусных транспортных систем (рис. 4а) двумерными координатными квазиклеточными сетями. При этом не рассматривается третья координата, определяющая высоту, а в качестве дополнительного параметра в состав B_i выбирается «цвет» участка. Кроме того, в транспортных интерпретациях проблема анастомоза актуальна для участков с многополосным движением (рис. 4б) – переход возможен в клетки в поперечном направлении (номер полосы рассматривается как дополнительная координата).

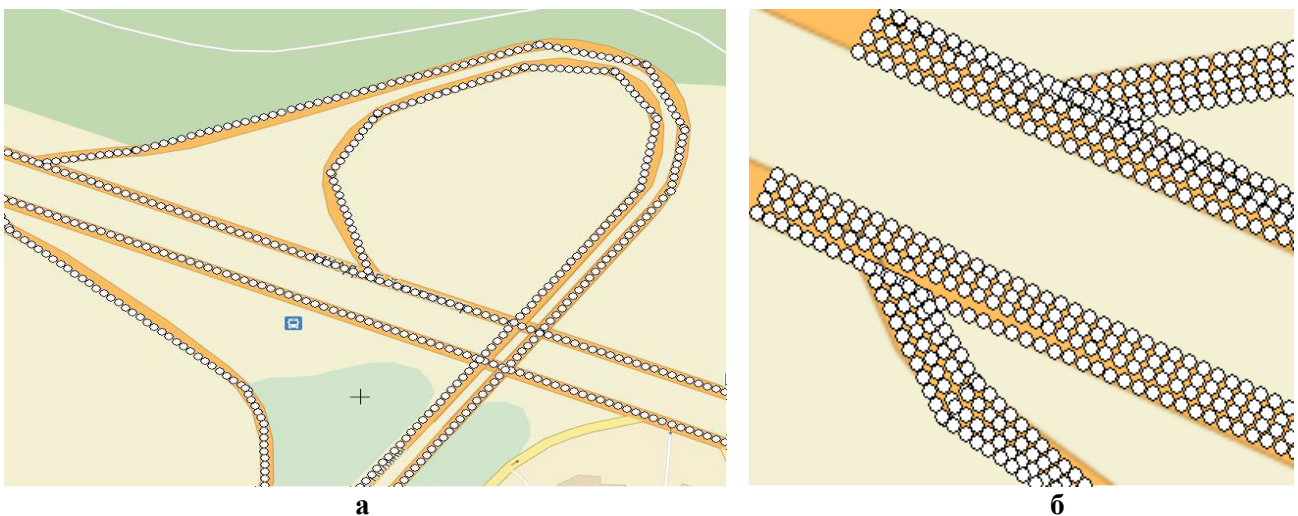


Рис. 4. Модели транспортных на основе квазиклеточных сетей с анастомозом:
а – многоярусная транспортная система; б – многополосное движение

Библиографический список

1. **Аристов, А.О.** Теория квазиклеточных сетей / А.О. Аристов. – М: МИСиС, 2014. – 188 с.
2. **Аристов, А.О.** Квазиклеточные сети. Микро- и макро моделирование // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. – 2014. – №12. – С. 228-233.
3. **Аристов, А.О.** Анастомоз в квазиклеточных сетях // Международный журнал. Устойчивое развитие: наука и практика: электронный журнал. – 2014. – №2(13). – С. 164-168.
4. **Форд, Л.Р.** Потоки в сетях / Л.Р. Форд, Д.Р. Фалкерсон. – М.: Мир, 1966. – 277 с.
5. Горбатов, В.А. Фундаментальные основы дискретной математики / В.А. Горбатов. – М.: Физматлит, 1999. – 544 с.
6. **Петров, А.Е.** Тензорный метод двойственных сетей / А.Е. Петров. – М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2007. – 496 с.
7. Энциклопедический словарь медицинских терминов / под ред. Б.В. Петровского. – М.: Сов. энциклопедия, 1982. – 464 с.

*Дата поступления
в редакцию: 02.12.2020*

A.O. Aristov

**ANASTOMOSIS OF QUASI-CELLULAR NETS
AND ADEQUACY PROBLEMS OF MODEL CONVERSION**

National university of science and technology «MISiS»

Purpose: Conversion problems of theoretical graph models of flow systems (in different subject areas) to quasi-cellular net based models are described.

Design/methodology/approach: This conversion suggests transition from micro to macro level of modeling. Through the conversion it identified phenomenon of anastomosis. Anastomosis suggests neighborhood of areas in quasi-cellular nets based on different structures (without neighborhood) in macro models. It used graph edge coloring for calculation an additional coordinates for cells of quasi-cellular net model.

Findings: Additional coordinates calculation based on graph edge coloring decides an adequacy problems of model conversion associated with anastomosis

limitations/implications: This approach used for 2-dimensional quasi-cellular nets for simulation multi-layers or multi-line flow space. It considered some examples of described approach using for transport systems.

Originality/value: The simulation method based on new type of discrete structures called quasi-cellular nets. This model provides micro- and macromodeling under the same discrete structure. Coloring of basic graph edges and calculation additional cell coordinates provides to make correct conversion of graph model to quasi-cellular net micro model in different subject areas.

Key words: net, flow, simulation, micro model, macro model, quasi-cellular net, anastomosis, graph coloring.