

# ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МИМО-АГЕНТОВ В СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ

**Л.Ю. Жиликова**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: [zhilyakova@ipu.ru](mailto:zhilyakova@ipu.ru)

**Ключевые слова:** распространение активности, пороговые модели, гетерогенные сетевые модели, социальные сети, МИМО-агенты.

**Аннотация:** В работе описана формальная модель разнородных взаимодействий пользователей социальной сети. Модель предназначена для исследования динамических процессов распространения нескольких взаимодействующих видов активности. Пользователи представлены гетерогенными агентами, имеющими множество входов разных типов и множество выходов разных типов (МИМО-агентами). По каждому из возможных выходов агенты имеют пороговые функции активации, зависящие как от внешних воздействий, так и от предыдущих состояний агентов. Кроме того, для каждого агента заданы правила преобразования типов активности в тех случаях, когда множества типов входных и выходных активностей различны.

## 1. Введение

Анализ данных, полученных за последние годы в ряде предметных областей, таких как биология, нейрофизиология, социология, когнитивные науки, показывает, что внутрисистемные взаимодействия в них могут быть описаны большими сетями со сходными статистическими свойствами, т.н. сложными, или безмасштабными, сетями [1]. По происхождению эти сети можно условно разделить на два больших класса. Первый из них задает статическую структуру связей, в которой представлены все потенциально возможные взаимодействия; второй – это актуализированные динамические подсети, возникающие при распространении той или иной активности, т.е. функциональные сети [1-3]. Причем, под *активностью* можно понимать как некоторый однородный динамический процесс, развивающийся во времени и последовательно охватывающий различные узлы и группы узлов [4-6], так и разнородные процессы, отличающиеся способами воздействия на одни и те же узлы, порогами активации, скоростью распространения [7].

Абстрактная гетерогенная модель, описанная в [7], легла в основу предметных моделей ([8] и, частично, [9]). Работа [8] содержит исследование распространения пары антагонистических активностей в среде агентов с заданными связями. Каждый из агентов характеризуется уникальным набором параметров, включающих в себя два порога активации (по одному на каждый тип активности), два потенциала, характеризующих близость к активации по тому или иному типу, и знаки, указывающие на отношение агента к каждому из типов активности. В статье [9] строится модель гетерогенной нейронной сети, в которой нейроны взаимодействуют с помощью нескольких различных нейротрансмиттеров, поступающих в общее внеклеточное пространство (ВКП). Нейро-

ны в этой модели обладают эндогенной активностью и способны генерировать спайки в отсутствие внешних воздействий. При активации нейроны выбрасывают специфический для них трансмисмиттер в ВКП; нейроны имеют наборы рецепторов, каждый из которых способен воспринимать один трансмисмиттер. Трансмисмиттеры, в зависимости от весов рецепторов, могут оказывать тормозящее или возбуждающее воздействие на нейрон. Таким образом, разный химический состав ВКП может породить разные паттерны активности нейронных ансамблей.

В настоящей работе формализмы из [7 – 9] модифицированы для моделирования разнородных взаимодействий пользователей социальной сети и исследования динамических процессов распространения нескольких интерферирующих видов активности. Пользователи представлены агентами, имеющими множество входов разных типов и множество выходов разных типов (причем, входное и выходное множества не всегда совпадают). Именно в этом смысле будем называть таких агентов ММО-агентами. В [10] описана модель синхронизации гетерогенных ММО-агентов. Мы будем рассматривать не синхронизацию и поиск консенсуса, а распространение нескольких разных видов активностей в гетерогенных сетях ММО-агентов.

## 2. Описание модели

### 2.1. Основные понятия

Опишем сеть взаимодействия сложных агентов как систему  $S = \langle N, C, R_c \cup \{R_0\} \rangle$ .

$N = \{1, \dots, M\}$  – множество агентов, обладающих внутренней структурой. Структура агентов будет описана в разделе 2.2.

$C = \{c_1, \dots, c_m\}$  – множество типов активности, потенциально возможных в сети. Будем ассоциировать их с различными цветами.

$R_c = \{R_{c_1}, \dots, R_{c_m}\}$  – множество матриц размера  $N \times N$ , задающих цветные графы, связывающие агентов по выделенному типу активности,  $R_0$  – матрица графа связей, не относящихся ни к одному из перечисленных типов, и, соответственно, не имеющих цвета.

Цвета  $c_i$  соответствуют активностям различной семантики. Например,  $c_1$  – политическая активность (политические интересы),  $c_2$  – спортивные интересы,  $c_3$  – рукоделие,  $c_4$  – охота и рыбалка. Разумеется, в зависимости от модели, эти типы могут укрупняться или детализироваться. Так,  $c_1$  можно разбить на либеральную и консервативную части,  $c_2$  разделить по видам спорта, в  $c_3$  выделить вязание, кройку и шитье, и т.д.

Каждый пользователь социальной сети имеет некоторый набор интересов и соответствующий круг общения по каждому из них. Некоторые из этих кругов могут сильно пересекаться, другие – практически не имеют пересечений. Каждый такой круг общения задается своей матрицей  $R_{c_i}$ .

Введем матрицу  $R = R_0 + \sum_{i=1}^m R_{c_i}$ . Эта матрица соответствует всем возможным потенциальным связям между агентами. Будем называть ее *полной структурной матрицей* сети.

Заметим, что полная структурная матрица остается неизменной при любом задании множеств активности  $C$  и, соответственно, любом разбиении ее на составляющие  $R_{c_i}$ . В предельном случае, когда  $C = \{c_1\}$ , модель вырождается в однородную пороговую модель распространения активности.

Набор типов активностей  $C$  является основополагающим для структуры возникающих функциональных сетей. При выделении типов моделируемых активностей одни потенциальные связи между агентами будут использованы целиком, другие – частично,

третьи – будут полностью игнорироваться. Так, если исследуется сеть профессиональных связей, то такие свойства агентов как их хобби, способы проведения досуга, литературные предпочтения и многие другие, не будут вносить вклад в топологию сети. Однако для других исследований сеть, образованная теми же агентами, может быть составлена из принципиально иных связей.

Все графы сети ориентированы. Если между агентами  $i$  и  $j$  существует направленная связь цвета  $c_k$ , это означает, что агент  $i$  может быть активен по типу  $c_k$ , а агент  $j$  может быть восприимчив к этому цвету, таким образом, агент  $i$  влияет на агента  $j$  по типу  $c_k$  с силой влияния  $(r_{c_k})_{ij}$ .

Динамика системы происходит в дискретном времени  $t$ .

Опишем структуру произвольного агента и дадим определение его «активности» и «восприимчивости». Восприимчивость соответствует множеству входов – *Multiple Input*, а потенциально разные типы активности – множеству выходов, *Multiple Output*.

## 2.2. Структура ММО-агентов

На каждого агента может влиять множество его соседей, причем, влияние некоторого типа активности может быть как возбуждающим, так и тормозным. Возбуждение или торможение является не атрибутом самого цвета (типа активности), а пары [агент + цвет], поскольку реакция каждого агента на данный цвет индивидуальна. Будем ассоциировать возбуждение со знаком «+», торможение – со знаком «-». Поскольку знак каждого цвета является индивидуальной характеристикой агента, будем приписывать знаки не весам связей (элементам матриц), а некоторым обобщенным слотам, куда будут собираться все входные связи данного цвета. Тогда веса при любом знаке воздействия будут соответствовать его силе; в этом случае суммирование матриц  $R_{c_i}$  в формуле для матрицы  $R$  будет корректным.

Под весом слота будем понимать суммарную полустепень захода дуг данного цвета. Для агента  $i$  и цвета  $c_j$  обозначим этот вес через  $r_{ij}^{in}$ . Знак слота будем обозначать через  $s_{ij} \in \{1, -1\}$ .

Таким образом, произвольный агент  $i$  характеризуется следующим набором параметров:

- множество входных слотов (их цвета  $c_j^{in}$ , веса  $r_{ij}^{in}$  и знаки  $s_{ij}$ );
- множество выходных активностей и соответствующих им выходных дуг (их цвета  $c_k^{out}$  и веса  $(r_{c_k})_{il}$ );
- правила преобразования входных активностей в выходные;
- пороги активации  $P_{ik}$ ;
- память.

Множество выходных активностей задает весь потенциальный набор ответов агента на пришедшее возбуждение. В каждый момент времени агент может быть активным по одному или нескольким типам, т.е. иметь выходную активность одного или нескольких цветов. Типы активации задаются правилами преобразования входной активности в выходную. Наборы цветов входных и выходных активностей могут не совпадать. Для того чтобы каждый агент мог при активации выбрать один или несколько из доступных ему цветов, задаются правила их преобразования.

**2.2.1. Правила преобразования типов активностей.** Опишем правила преобразования входных активностей в выходные на абстрактном примере.

Пусть агент  $i$  имеет три входных положительных активности с цветами  $c_1^{in}$ ,  $c_2^{in}$ ,  $c_3^{in}$  и две потенциальных выходных активности  $c_1^{out}$ ,  $c_4^{out}$ .

- I. *Single Input, Single Output*. Поскольку тип  $c_1$  имеется в обоих множествах, правило для него задается простым соответствием:  $c_1^{in} \rightarrow c_1^{out}$ . Назовем его *SISO-правилом первого типа*:

$$c_k^{in} \rightarrow c_k^{out} \text{ — что на входе, то и на выходе.}$$

- II. *Single Input, Single Output*. Тип  $c_2$  отсутствует в потенциально возможных выходах агента  $i$ . Он может преобразоваться целиком в один из доступных видов, например,  $c_1$ :  $c_2^{in} \rightarrow c_1^{out}$ . Такое правило будем называть *SISO-правилом второго типа*:

$$c_k^{in} \rightarrow c_l^{out} \text{ — на входе одна активность, на выходе другая.}$$

- III. *Multiple Input, Single Output*. Если на входе у агента присутствуют одновременно две активности  $c_1$  и  $c_2$ , агент, как видно из двух предыдущих случаев, активизируется по одному и тому же типу:  $c_1$ . Это правило *MISO*, которое также может быть в двух конфигурациях. В первой конфигурации один из цветов выходных активностей совпадает с входным цветом, во второй — все цвета разные.

$$\{c_k^{in}, \dots, c_j^{in}\} \rightarrow c_k^{out};$$

$$\{c_k^{in}, \dots, c_j^{in}\} \rightarrow c_l^{out}, l \notin \{k, \dots, j\}.$$

- IV. *Single Input, Multiple Output*. Тип  $c_3$  также отсутствует в потенциально возможных выходах агента. Однако, в отличие от  $c_2$ , он трансформируется не в одну, а сразу в две выходные активности:  $c_1$  и  $c_4$ . Это правило назовем правилом *SIMO*. Оно также может быть двух типов.

$$c_k^{in} \rightarrow \{c_k^{out}, \dots, c_j^{out}\};$$

$$c_l^{in} \rightarrow \{c_k^{out}, \dots, c_j^{out}\}, l \notin \{k, \dots, j\}.$$

- V. *Multiple Input, Multiple Output*. Если на входе у агента присутствуют одновременно две активности  $c_1$  и  $c_3$ , агент активизируется по двум типам:  $c_1$  и  $c_4$ . Это правило *MIMO*:

$$\{c_k^{in}, \dots, c_j^{in}\} \rightarrow \{c_l^{out}, \dots, c_p^{out}\}.$$

Множества цветов в левой и правой части правила *MIMO* могут пересекаться или быть полностью различными.

**2.2.2. Время.** Распространение активностей в сети происходит в дискретном времени  $t$ . В начале каждого такта агенты рассчитывают свои функции активации по каждому типу, а затем активируются, если значения некоторых функций превысили пороговые величины. На первом такте, поскольку внешнего возбуждения еще не было, активируются агенты с нулевыми порогами активации.

**2.2.3. Пороги активации.** Если бы преобразование цветов активностей ограничивалось только первыми тремя случаями, т.е., выход был бы всегда только одного цвета, активация агента зависела бы только от одного порога: вклад множественных входных активностей задавался бы с помощью соответствующих весов дуг графа. Однако при множественной выходной активности (правила IV и V) агент, в принципе, может активизироваться по любому из подмножеств «разрешенного множества» активностей. Поэтому, единый порог активации недостаточен для проведения различий в множественной выходной активности агента.

Таким образом, на каждой выходной тип  $c_k^{out}$  существует отдельный порог активации  $P_{ik}$ . Однако агент активируется на некотором такте  $t$  не только в том случае, если

некоторое возбуждение превысило порог на этом такте. Он помнит предыдущие состояния сети и активности в ней, поэтому с порогом сравнивается сумма двух величин: возбуждения/торможения и памяти.

**2.2.4. Память.** Введем величину возбуждения (функцию активации) агента  $i$  по типу  $c_k$ .

$$M_{ik}(t) = \alpha \cdot M_{ik}(t-1) + \sum_{c_k \in C_i^{out}(t)} S_{ik} \cdot r_{ik}^{in}.$$

Первое слагаемое соответствует памяти агента о внешнем воздействии на него по данному типу, пришедшем на предыдущих тактах. Коэффициент  $\alpha \in (0, 1)$  задает скорость забывания агента. Второе слагаемое определяет воздействие на текущем такте  $t$ . Суммирование происходит по множеству типов  $C_i^{out}(t)$ . Оно соответствует всем таким типам  $c_k^{out}$ , для которых нашлись входные воздействия на агента, присутствующие в левой части хотя бы одного правила, в правой части которого присутствует  $c_k^{out}$ .

Рассчитанное значение  $M_{ik}(t)$  может быть как положительным, так и отрицательным, если агент получает только тормозные воздействия. Это значение сравнивается с пороговыми величинами всех цветов из множества типов  $C_i^{out}(t)$ . Если для некоторого цвета порог превышен, агент активируется по данному типу. Активность агента распространяется ко всем его соседям по данному цвету (данным цветам).

### 3. Заключение

В работе описана модель распространения нескольких видов активности в сети, составленной взаимодействующими гетерогенными ММО-агентами.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты 18-29-22042мк, 17-07-00541а).

### Список литературы

1. Newman M.E.J. The structure and function of complex networks // SIAM Rev. 2003. Vol. 45, No. 2. P. 167-256.
2. Bullmore E. Sporns O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems // Nature Reviews Neuroscience. 2009. Vol. 10. P. 186-198.
3. Baronchelli A., Ferrer-i-Cancho R., Pastor-Satorras R., Chater N., Christiansen M.H. Networks in Cognitive Science // Trends in Cognitive Sciences. 2013. Vol. 17, No. 7.
4. Kempe D., Kleinberg J., Tardos E. Maximizing the Spread of Influence through a Social Network // Proceedings of the 9-th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2003. P. 137-146.
5. Breer V.V., Novikov D.A., Rogatkin A.D. Mob Control: Models of Threshold Collective Behavior. Series: "Studies in Systems, Decision and Control". Heidelberg: Springer, 2017. 134 p.
6. Gubanov D.A., Chkhartishvili A.G. Models of information opinion and trust control of social network members // IFAC Proceedings Volumes. 2011. Vol. 44, No. 1. P. 1991-1996.
7. Жилиякова Л.Ю. Сетевая модель распространения нескольких видов активности в среде сложных агентов и её приложения // Онтология проектирования. 2015. Т. 5, № 3 (17). С. 278-296.
8. Zhilyakova L., Gubanov D. Double-threshold Model of the Activity Spreading in a Social Network. The Case of Two Types of Opposite Activities // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies AICT2017. 2017. Vol. 2. P. 267-270.
9. Kuznetsov O.P., Bazenkov N.I., Boldyshev B.A., Zhilyakova L.Yu., Kulivets S.G., Chistopolsky I.A. Discrete Model of Asynchronous Multitransmitter Interactions in Biological Neural Networks // In: Kuznetsov S., Osipov G., Stefanuk V. (Eds) Artificial Intelligence. RCAI 2018. Communications in Computer and Information Science. Vol 934. Springer, 2018. P. 190-205. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00617-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00617-4_18)

10. Zhu L., Chen X., Chen Z., Hill D. J. Output Synchronization of Linear MIMO Heterogeneous Multi-agent Systems via Output Communication // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, No. 1. P. 1748-1753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.503>