

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТИЖЕНИЕМ КОНСЕНСУСА ПРИ ДОВЕРИИ АГЕНТОВ ЛИШЬ БЛИЗКИМ ИМ МНЕНИЯМ

Федянин Д.Н.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65
dfedyanin@inbox.ru

Аннотация: В докладе рассматривается управление, состоящее в выборе агентов в социальной сети и изменение их мнений сравнение алгоритмов управления достижением консенсуса при доверии агентов лишь близким им мнениям. В работе уделяется особенное внимание жадным алгоритмам, а также противоборству управляющих центров.

Ключевые слова: социальные сети, динамика мнений, противоборство

Введение

Доверие агентов задается как связями в социальной сети, так и отличием их собственных мнений от мнений других агентов. Например, в одном из важных частных случаев, агенты игнорируют мнения агентов, с которыми они не связаны в социальной сети или мнения которых отличаются более чем на заданное значение. Исследований этой модели и ее модификаций очень много, например, [2-13]. Мнения моделируются векторами действительных или целых чисел (в зависимости от модели) и в многомерном пространстве с евклидовым расстоянием или другой метрикой. Известно, что в таких моделях консенсус бывает недостижим.

1 Постановка задачи

Рассматривается задача динамического управления лидерами мнений. Задача консенсуса, поляризации и управления уже рассматривалась (но в других вариантах) в работах, например, [1,13,14]. Задача привести к консенсусу максимальное количество агентов за минимальное время, т.е. задача многофакторной оптимизации и для исследования мы будем в том числе использоваться оптимальность по Парето.

$$\sum_j a_{ij} = 1 \quad (1)$$

$$x_i^{t+1} = \frac{\sum_j a_{ij} s(x_i^t, x_j^t) x_j^t}{\sum_j a_{ij} s(x_i^t, x_j^t)}, i \notin u; \quad x_i^{t+1} = u_i(x_1^t, \dots, x_n^t, t+1), i \in u \quad (2)$$

$$\sum_T \sum_{i \in u} |x_i^{t+1} - x_i^t| \rightarrow \max \quad (3)$$

$$T = \arg \min_t \left\{ t : \max \{x_1^t, \dots, x_n^t\} - \min \{x_1^t, \dots, x_n^t\} \leq \varepsilon \right\} \rightarrow \min \quad (4)$$

$$s(x_i^t, x_j^t) = \begin{cases} 1, & |x_i^t - x_j^t| \leq R, \\ 0, & |x_i^t - x_j^t| > R, \end{cases} \quad (5)$$

$$\max \{x_1^t, \dots, x_n^t\} - \min \{x_1^t, \dots, x_n^t\} \leq \varepsilon \quad (6)$$

$$\left| \left\{ j : \exists t, u_1, \dots, u_k : \max_j |x_j^t - x_i^t| \leq \varepsilon \right\} \right| \rightarrow \max \quad (7)$$

2 Одномерный случай

В одномерном случае все мнения расположены на одной оси, распределение мнений задано плотностью.

Утверждение 1. Если мнения агентов стабилизировались, и мнение лидера мнений стабильно, то мнения всех агентов принимающих во внимание мнение лидера мнений совпадает с мнением этого лидера мнений.

Утверждение можно расширить на несколько лидеров мнений.

Пусть параметр области принятия во внимание для всех агентов одинаков, тогда назовем его радиусом толерантности. Ясно, что лидер мнений непосредственно влияет только на агентов мнения которых отличаются от мнения лидера мнений на радиус толерантности, при этом сам радиус толерантности является параметром агентов и в нашей модели не является управляемым параметром лидера мнений.

Назовем множество мнений агентов предсвязным, если граф в котором узлы – агенты, а отношение между агентами задается расположением их мнений на расстоянии не превышающем радиус толерантности, является связным.

Необходимое условие достижения консенсуса лидером мнений с неподвижным мнением состоит в том, что множество мнений агентов должно быть предсвязным. Однако оно не является достаточным.

Действительно, рассмотрим следующий пример. Пусть мнение лидера мнений 0, мнение первого агента 0,5, мнение второго агента 1, радиус толерантности 0,5. Если доверие первого агента к лидеру мнений будет полным, т.е. мнение первого агента на следующем шаге будет совпадать с мнением лидера мнений, то если доверие второго агента к первому равно 0,5. Тогда на первом на первом шаге мнения будут такими: лидер мнений - 0, первый агент – 0, второй агент $(0,5+1)/2 = 0,75$. Видно, что теперь мнение лидера мнений и первого агента лежат дальше радиуса толерантности от мнения второго агента и его мнение изменяться не будет, т.е. консенсус не будет достигнут.

Достаточным условием будет предсвязность множества мнений агентов в любой момент времени. Однако это условие не конструктивно, так как его проверка выглядит не менее сложной, чем само моделирование. Тем не менее, можно выписать условия на начальные значения, которые обеспечивают такую динамическую предсвязность.

Однако, если доверие первого агента лидеру мнений было бы равно 0,5 и 0,5 самому себе, а доверие второго агента первому было бы полным, то консенсус был бы достигнут. Из этого наблюдения следует, что консенсус будет достигнут, если агенты находящиеся к ближе к лидеру мнений смещают мнения в сторону его мнения медленнее, чем ближе к нему они находятся. В этом случае в любой момент времени не возникнет разрывов и множество мнений агентов будет предсвязным.

Утверждение 1. Если мнения агентов стабилизировались, и мнение лидеров мнений стабильно и выполняется условие непересечения областей влияния лидеров мнений, то мнения всех агентов принимающих во внимание мнения одного из лидеров мнений совпадает с мнением этого лидера мнений.

3 Алгоритмы управления для численного моделирования

Матрица влияния считалась следующей

$$A = (1 - a - b)B + aE + bI,$$

Где E – единичная матрица, I – матрица, все элементы которой равны 1, B – матрица загруженных данных, a – коэффициент доверия себе, b – коэффициент доверия незнакомым агентам.

Ненулевой коэффициент доверия себе требуется, так как если данные о социальной сети это переписка между агентами или отношения дружбы, то связи агента с самим собой не указаны и их следует добавить, а коэффициент доверия незнакомым агентам требуется для возможности сходимости при выборе любого агента лидером мнений, иначе требовался бы более аккуратный выбор с учетом того, что его влияние не которых агентов строго нулевое, даже если его мнение близко к их мнению. Для решения задачи при $b=0$ предлагаемые методы не могут гарантировать сходимость, впрочем, доверие незнакомцам кажется вполне реалистичным предположением.

Алгоритмы

1. Управление не осуществляется
2. Управление одним лидером мнений
 - a. Постоянная скорость изменения мнения. Начальное мнение лидера мнений – на расстоянии радиуса толерантного от самого крайнего нижнего (верхнего) и затем с изменение с постоянной скоростью.
 - b. Адаптивное изменение мнения. Начальное мнение лидера мнений – на расстоянии радиуса толерантного от самого крайнего нижнего (верхнего) и затем с изменение мнения пока не будет достигнут консенсус, завершится заданное время моделирования или будет достигнуто крайнее верхнее (нижнее) мнения. Отличие от постоянного изменения мнения в том, что крайнее мнение вычисляется на каждом шаге заново.

3. Управление двумя лидерами мнений (только адаптивное). Одновременно осуществляется адаптивное управление снизу вверх и сверху вниз.
4. Управление четырьмя лидерами мнений (только адаптивное). Одновременно осуществляется адаптивное управление снизу вверх и сверху вниз. При этом вторая пара лидеров мнений располагает свои мнения на расстоянии 3 радиусов толерантности от крайнего.

Условие остановки одинаково: пока не будет достигнут консенсус, завершится заданное время моделирования или будет достигнуто крайнее верхнее (нижнее) мнение.

2 Результаты моделирования

Были использованы 4 реальных социальных сети и одна случайная сеть

6. Модель Эрдоша-Реньи случайной социальной сети [21].
7. Внутренняя сеть электронной почты между сотрудниками средней производственной компании. Сеть направлена, а узлы представляют сотрудников. Левый узел представляет отправителя, а правый узел представляет получателя. Края между двумя узлами - это отдельные электронные письма. [15]
8. Социальная сеть состоит из 3-х видов (совместная работа, дружба и совет) между партнерами и партнерами корпоративного правового партнерства [17].
9. Социальная сеть состоит из 3-х видов отношений (Совет, Дружба и «Отчеты») между менеджерами высокотехнологичной компании [16, 18].
10. Социальная сеть состоит из пяти видов онлайн- и офлайн-отношений (Facebook, досуг, работа, соавторство, обед) между сотрудниками отдела компьютерных наук в Орхусе [19].

На диаграммах представлены несколько графиков:

- графики “а”- динамика мнений без управления на большом интервале,
- графики е” – тоже как и “а”, но на коротком интервале для иллюстрации переходного процесса сразу после начала моделирования, так как на других диаграммах переходный масштаб начальной кластеризации слабо различим из-за общей длины интервала моделирования,
- графики “б” – динамика мнений при медленном постоянном изменении мнения одного лидера мнений от меньшего мнения к большему.
- графики “д” – динамика мнений при медленном постоянном изменении мнения одного лидера мнений от большего мнения к меньшему,
- графики “в” – динамика мнений при адаптивном (оптимальном) изменении мнения одного лидера мнений от меньшего мнения к большему.
- графики “ж” – динамика мнений при адаптивном (оптимальном) изменении мнения одного лидера мнений от большего мнения к меньшему,
- графики “г” – динамика мнений при одновременном адаптивном изменении мнений двух лидеров мнений от большего мнения к меньшему, и от меньшего мнения к большему.
- графики “з” – динамика мнений при одновременном адаптивном изменении мнений четырех лидеров мнений: двух несовпадающих от большего мнения к меньшему, и двух несовпадающих от меньшего мнения к большему.

4 Свойства алгоритма управления

Отметим свойства.

- медленное приведение к консенсусу по сравнению с начальной кластеризацией мнений
- предлагаемое управление четырьмя лидерами мнений приводит к консенсусу быстрее, чем двумя, а двумя быстрее чем один, что должно выполняться для эффективных алгоритмов управления
- постоянное изменение мнения лидером мнений не дает стабильного результата или заметно медленней
- для реальных сетей и случайной сети алгоритмы управления дают аналогичные графики изменения мнений
- предложенное управление приводит к консенсусу
- предложенное управление начинается с завоевания доверия у носителей наиболее крайних мнений, т.е. лидеры мнений в начале управления – носители радикальных мнений,

- если управление осуществляется одним лидером мнений, то консенсус быстрее всего достигается если лидер мнений меняет свое мнение с одного крайнего до другого крайнего и консенсус впервые достигается именно на крайнем мнении.
- скачки на графиках обусловлены тем, когда на расстояние радиуса толерантности от мнения крайнего попадает мнение более умеренного, лидер мнения может изменить свое мнение, быстрее не опасаясь потери предсвязности, т. к. носитель крайнего мнения теперь начал изменять свое мнение под влиянием не только лидера мнений, но и другого более умеренного агента.

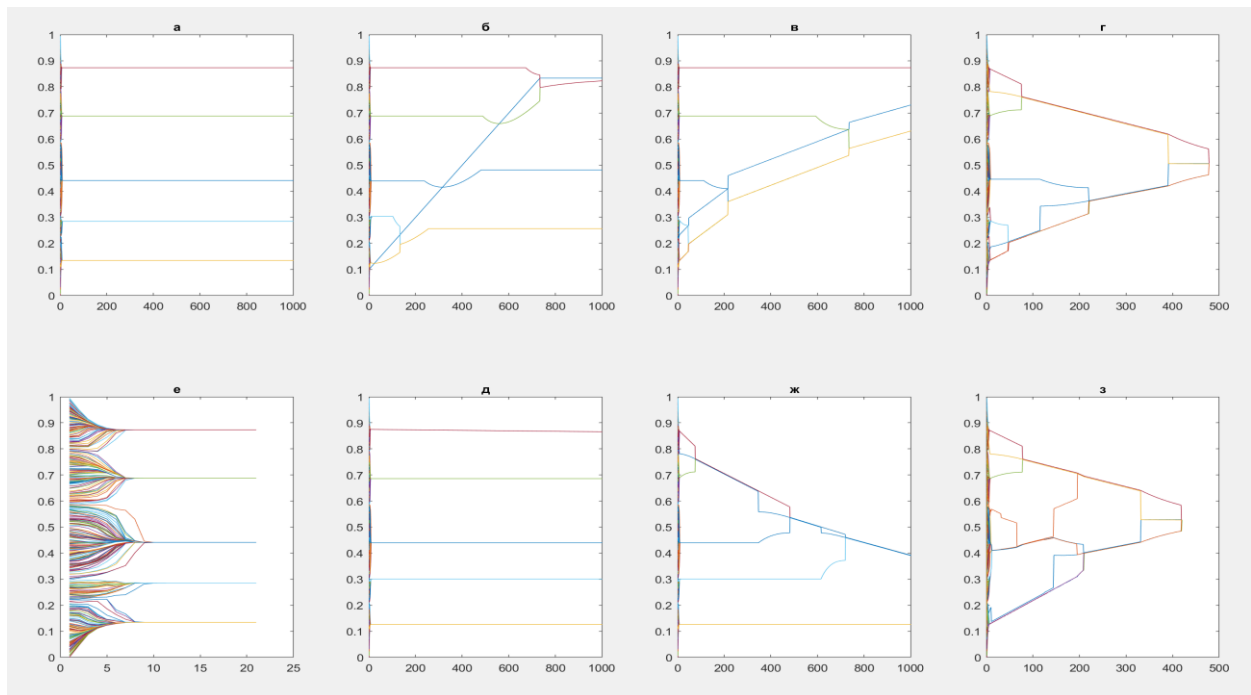


Рис. 1. Динамика мнений для набора данных 1. Модель Эрдоса-Реньи случайной социальной сети [21]

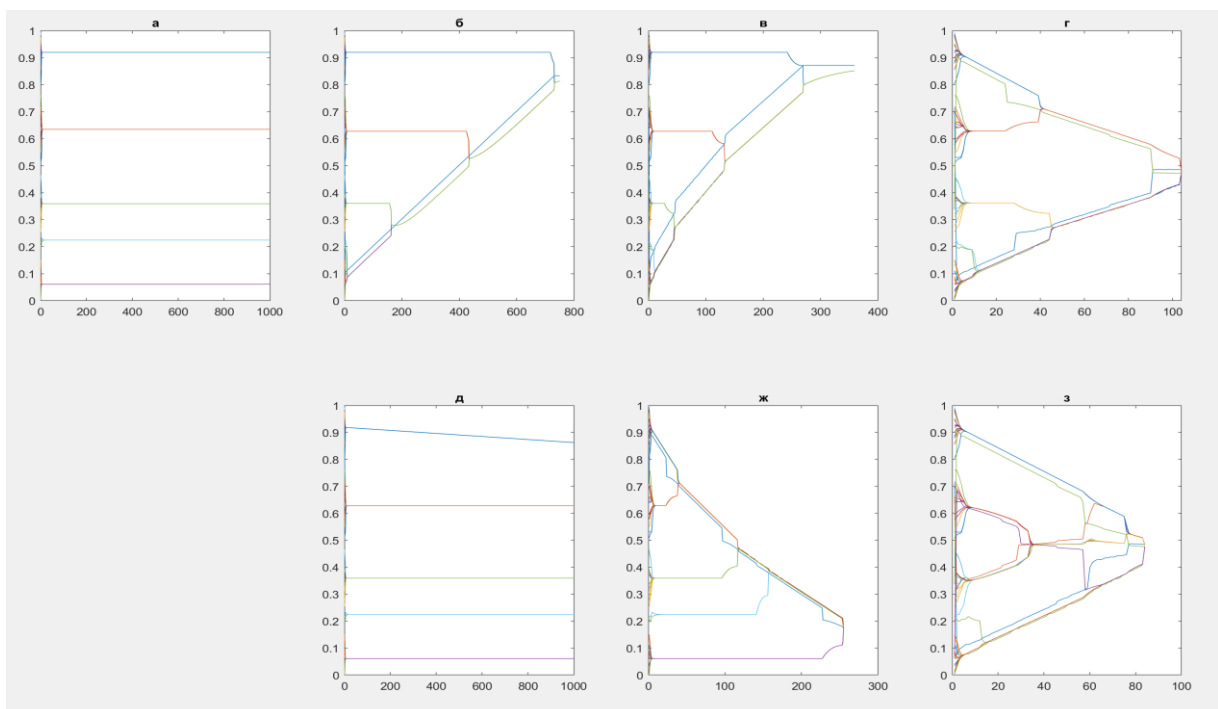


Рис. 2. Динамика мнений для набора данных 2. Внутренняя сеть электронной почты между сотрудниками средней производственной компании. [15]

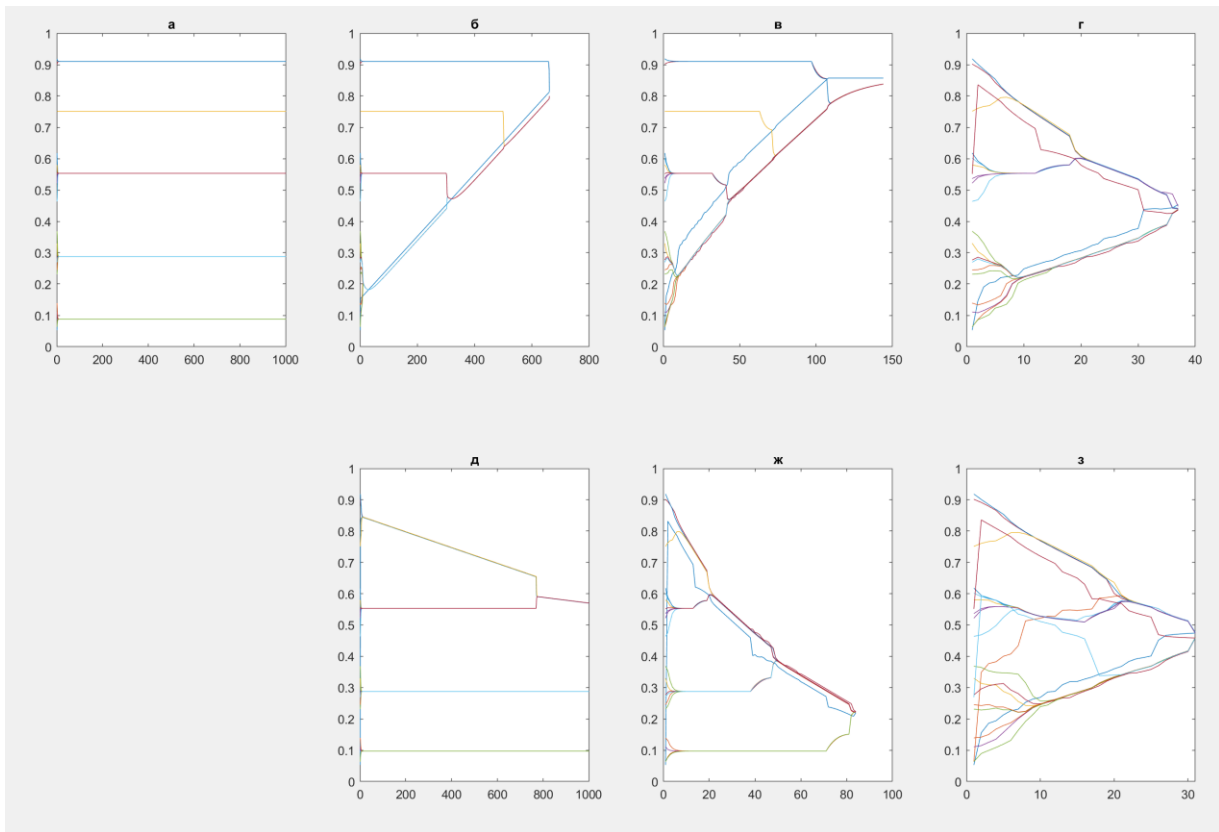


Рис. 3. Динамика мнений для набора данных 3. Социальная сеть состоит из 3-х видов (совместная работа, дружба и совет) между партнерами корпоративного правового партнерства

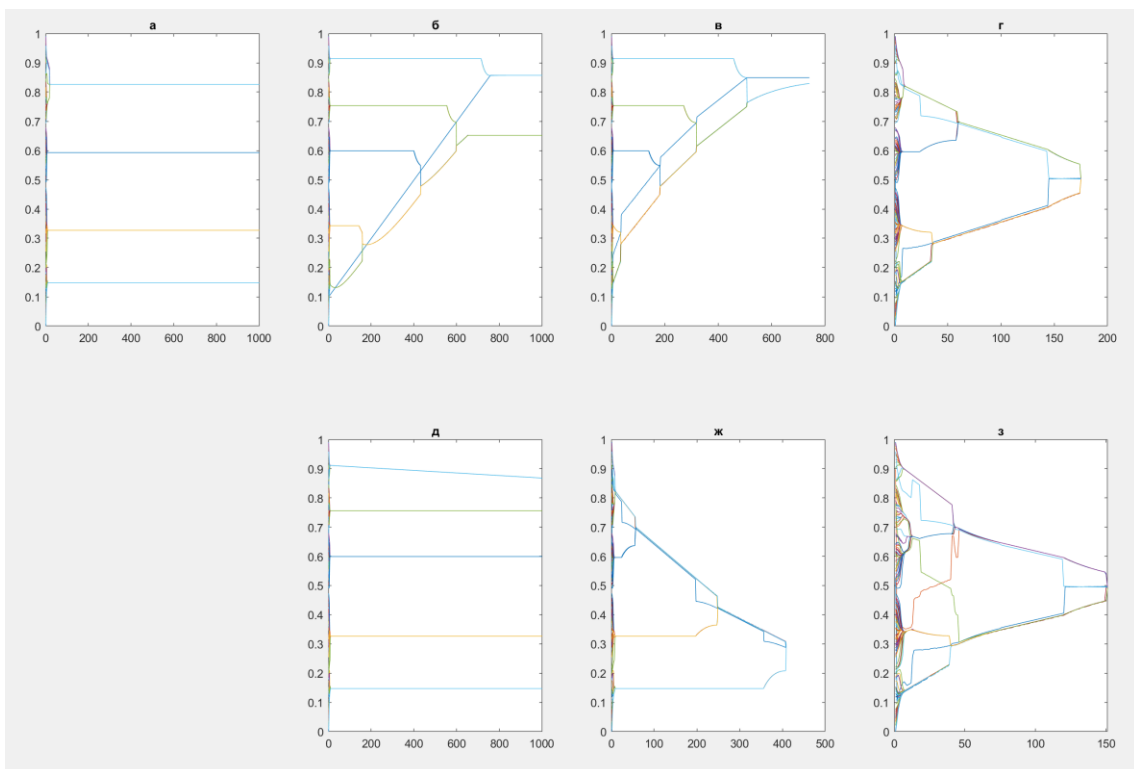


Рис. 4. Динамика мнений для набора данных 4. Социальная сеть состоит из 3-х видов отношений (Совет, Дружба и «Отчеты») между менеджерами высокотехнологичной компании

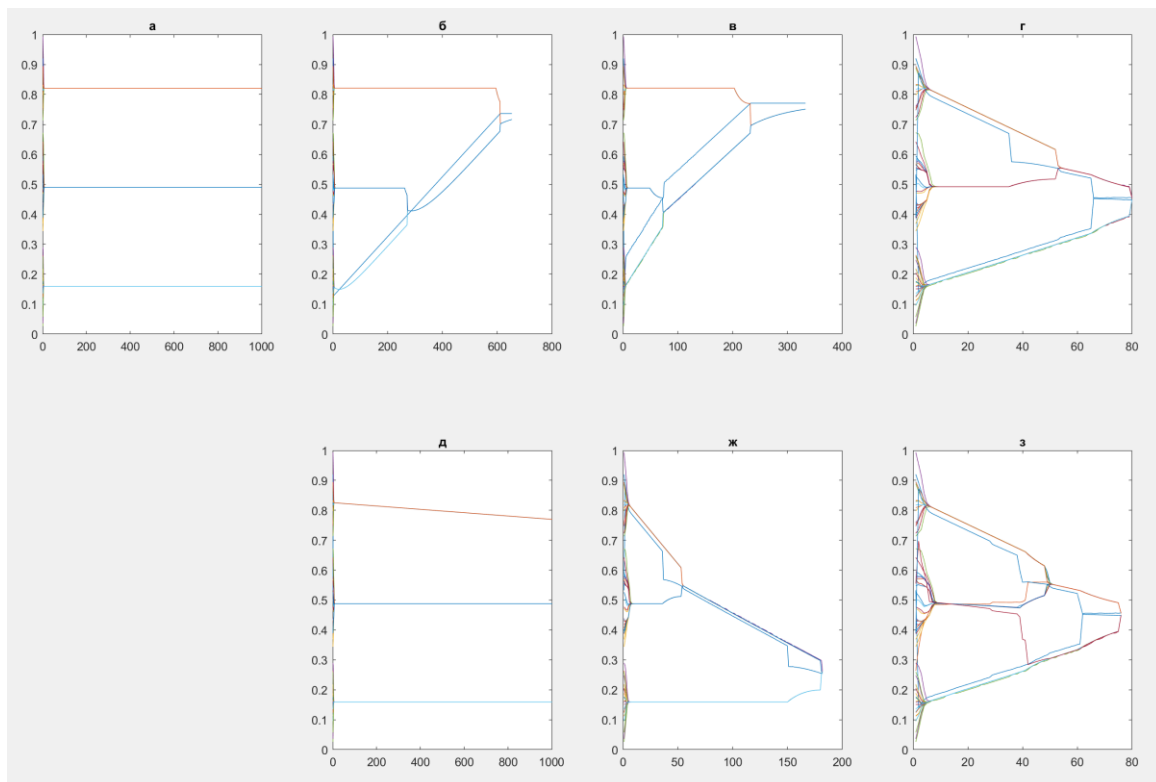


Рис. 5. Динамика мнений для набора данных 5. Социальная сеть состоит из пяти видов онлайн- и офлайн-отношений (Facebook, досуг, работа, соавторство, обед) между сотрудниками отдела компьютерных наук в Орхусе [19].

5 Идентификация

Предлагаемые алгоритмы управления допускают их идентификацию, так как имеют характерные особенности:

- монотонно возрастающее количество агентов в радиусе толерантности некоторых из агентов, уменьшение количества автономных кластеров мнений (под автономным кластером мнений здесь понимается предсвязанное множество мнений, не связанное с другими предсвязанными множествами мнений).
- изменение мнения одного агентов
- отсутствие зависимости мнения одного из агентов от мнений окружающих его агентов

Однако алгоритмы допускают модификации, позволяющие противодействовать такой идентификации, а именно:

- отключать управление от лидера мнений переводя его в статус просто агента и выбирать какого-то из соседних агентов на роль лидера мнений.
- используя возможность выбора новых лидеров мнений вычислять оптимальное изменение мнение лидера мнений и прекращения с ним сотрудничества выбирая нового лидера мнений среди агентов с мнениями близкими к тому каким должно было бы быть измененное мнение прежнего лидера мнений.
- изменять мнения
 - добавляя к ним броуновский шум
 - совершая значительные движения в противоположном оптимальному направлению, сохраняя при этом движение среднего значения в оптимальном направлении
- также отсутствие зависимости от мнений других можно скрыть частым выбором новых лидеров мнений затрудняя определение моментов времени, в которые конкретный агент выполняет функцию лидера мнений
- воздействовать малым управлением на всех агентов, что, однако выходит за рамки текущего исследования

6 Теоретико-игровое и сетевое развитие направления

6.1 Сетевые и многоуровневые системы лидеров мнений

Пусть управление лидерами мнений невозможно напрямую. Введем иерархию лидеров мнений.

- Лидер мнения любого уровня прислушивается только к лидерам мнения
 - более высокого уровня
 - такого же как он уровня или более высокого
 - уровня ровно на единицу большего
- Лидер максимального уровня напрямую управляется центром.

Обычного агента в этом случае можно рассматривать как лидера мнений нулевого уровня, хотя в данном случае применение к нему названия лидер мнения уже не будет выглядеть обоснованным.

Возникает задача исследования зависимости эффективности достижения консенсуса для структур с заданным количеством лидеров мнений каждого уровня. Если дополнительно ввести различие затрат на поддержание работы лидеров мнений в зависимости от контролируемого им сегмента мнений возникнет задача о оптимальной структуре иерархии и можно было бы попробовать применить результаты, полученные для секционных функций затрат. Получается задача изучения самих секционных функций как функций над заданным вероятностным распределением и топологией в метрическом пространстве. Возможно, на этом частном случае будет возможно выписать в явном виде нетривиальные зависимости для оптимальных динамических структур.

Одно из отличительных свойств сетевой и многоуровневой системы управления – возможность достижения консенсуса только одним агентом при этом не изменяя его мнения при любом начальном распределении мнений агентов. Для этого требуется расположить лидеров агентов мнений таким образом, чтобы они образовывали предсвязанное множество мнений. При этом всегда можно подобрать такое количество лидеров мнений и такие доверия их другим лидерам мнений, что будет достигаться консенсус. Разумеется, в этом случае мнения вспомогательных лидеров мнений будут меняться, однако управление оказываемое на них не является прямым.

Вообще говоря, этого же эффекта можно достичь всего одним, но сетевым уровнем, т.е. при условии взаимного влияния лидеров мнений друг на друга. Так как при нашей базовой однослойной постановке влияние на лидеров мнений оказывается напрямую и они не влияют друг на друга в смысле матрицы влияния, то этот случай мы решили выделить отдельно. Вопрос о возможности замены любой многослойной системы управления лидерами мнений некоторой сетевой системой пока нами не проработан и рассматривается как открытая проблема.

6.2 Противоборство

Возможны случаи противоборства при возможности нескольких центров управлять разными лидерами мнений. Целевые функции центров могут быть выраженными формальными методами стремления центров

- к любому консенсусу
- к консенсусу в заданной точке
- к отсутствию консенсуса в заданной точке
- к отсутствию консенсуса
- к кластеризации
- к поляризации

Пусть один игрок заранее выбирает лидеров мнений и не меняет их мнения, при этом имея цель не допустить приведение к консенсусу других агентов. Второму игроку требуется какое наибольшее количество агентов и какими действиями можно привести к консенсусу. В качестве гипотез представляется возможным предложить три управления

11. описанное ранее динамически подстраивающее скорость изменения мнения. Если мнения лидеров мнения первого игрока не велики, они лишь замедлят процесс приведения к консенсусу, но не исключают его. Отметим, что если бы использовалось неадаптивное управление, т.е. с постоянной скоростью изменения мнений лидеров мнений второго игрока, то при том же противодействии цели иногда можно было бы не достигнуть.
12. выбрать множество агентов с мнениями между мнениями лидеров мнений первого агента и сконцентрироваться на них. Такой вариант может быть единственным при очень большом влиянии лидеров мнения первого игрока. Задача в этом случае становится близкой к задаче дауна, играми Вороного и другим позиционным играм в части вычисления наилучшего ответа

13. довольно экзотический, однако в некоторых случаях действенный. Требуется два лидера мнений второго игрока. В этом случае один лидер подводит наиболее влиятельных агентов как можно ближе к лидеру мнений первого игрока с тем, чтобы, когда второй лидер мнений второго игрока подведет свою группу агентов к мнению лидера мнений первого игрока но с другой стороны оси, тогда эти агенты оказались под влиянием агентов подверженных влиянию первого лидера мнений второго игрока и таким образом влияние мнения лидера мнений первого агента существенно ослабло.

6.3 Сложность

Задача даже для одного лидера мнений в общем случае сложна так как при наличии штрафа за изменения мнения лидера мнений ее частным случаем является задача коммивояжера, которая NP-трудна. Таким частным случаем является случай, когда радиус толерантности достаточно мал. Отметим, что если радиус толерантности строго равен нулю, то лидеры мнений бесполезны, так как их будут слушать лишь в том случае, если подтверждают мнения самих агентов, а это означает, что агенты не будут изменять свои мнения.

Отметим, что задача об управлении несколькими лидерами мнений имеет частным случаем классическое обобщение задачи коммивояжера на случай нескольких коммивояжеров. Такая задача, разумеется, тоже NP-трудна.

Однако если мнения можно расположить в метрическом пространстве в заданной выпуклой области, распределение мнений агентов предположить детерминированным равномерным, а матрицу доверия например заполненной одинаковыми значениями (кроме диагонали для выполнения условия нормализации). Тогда можно попытаться найти оптимальные начальные мнения лидеров мнений, а также получить оценки.

В такой задаче естественным образом возникает задача о противоборстве центров, управляющих разными лидерами мнений. Среди интересных вариаций отметим следующие

Заключение

Таким образом работе поставлена задача, предложены варианты управления, построены численные модели, проведены численные исследования реальных данных социальных сетей, обсуждены свойства и изучены вопросы идентификации и противоборства. Отметим, построенное управление работает аналогично окну Овертона [20], но в отличие от него построенная модель формальная.

Литература

1. *Губанов Д.А., Петров И.В.* Multidimensional Model of Opinion Polarization in Social Networks / Proceedings of the 12th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow, Russia: IEEE, 2019. С. 1-4
2. *Noorazar, Hossein, et al.* From classical to modern opinion dynamics. International Journal of Modern Physics C 31.07 2020: 2050101.
3. *Noorazar, H.* Recent advances in opinion propagation dynamics: a 2020 survey. The European Physical Journal Plus 135.6. – 2020. – С. 1-20.
4. *Yiyi Zh., et al.* Bounded confidence opinion dynamics with opinion leaders and environmental noises. Computers & Operations Research 74. 2016: С. 205-213.
5. *Atafini C., Ceragioli F.* Signed bounded confidence models for opinion dynamics. Automatica 93.– 2018. – С. 114-125.
6. *Hegselmann, R., Ulrich K.* Opinion dynamics and bounded confidence models, analysis, and simulation. Journal of artificial societies and social simulation 5.3.2002.
7. *Lorenz, J.* Continuous opinion dynamics under bounded confidence: A survey."International Journal of Modern Physics C 18.12.2007. – С. 1819-1838.
8. *McKeown, G., Sheehy, N.* Mass media and polarisation processes in the bounded confidence model of opinion dynamics. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 9(1) – 2006. – С.33-63.
9. *Ramirez-Cano, D., Pitt J.* Follow the leader: Profiling agents in an opinion formation model of dynamic confidence and individual mind-sets. 2006 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology. IEEE, – 2006.
10. *Shusong L., Shiyong Zh.* Leader and follower: agents in an opinion dynamics and bounded confidence model on the stochastic movement world. 2010 Second International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. Vol. 1. IEEE, – 2010.
11. *Zhao Y. et al.* Understanding influence power of opinion leaders in e-commerce networks: An opinion

- dynamics theory perspective. *Information Sciences*. – 2018. – Т. 426. – С. 131-147.
12. *Yilun Sh.* An agent based model for opinion dynamics with random confidence threshold." *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 19.10– 2014. – С. 3766-3777.
 13. *Dietrich F., Martin S., Jungers M.* Opinion dynamics control by leadership with bounded influence. 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, – 2016.
 14. *Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.* «Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства», 2010 – 228 стр.
 15. *Michalski R., Radoslaw, Palus, S., Kazienco, P.* Matching Organizational Structure and Social Network Extracted from Email Communication. *Proc. Int. Conf. on Bus. Inf. Syst.*, 2011, С. 197 – 206
 16. *Snijders T.A.B., Pattison P.E., Robins G.L.* Handcock *Sociological Methodology*. 2006, С. 99-153.
 17. *Lazega E.* *The Collegial Phenomenon: The Social Mechanisms of Cooperation Among Peers in a Corporate Law Partnership*. Oxford University Press (2001). 346 С.
 18. *Krackhardt D.* Cognitive social structures. *Social Networks* (1987), 9, С. 104-134
 19. *Magnani M., Micenkova B., Rossi L.* Combinatorial Analysis of Multiple Networks. arXiv:1303.4986 (2013)
 20. *Bobric G. D.* The Overton Window: A Tool for Information Warfare //ICWS 2021 16th International Conference on Cyber Warfare and Security. – Academic Conferences Limited, 2021. – С. 20.
 21. *Erdős, P.; Rényi, A.* On Random Graphs. I. *Publicationes Mathematicae*. 1959. 6: С.290–297.