

ФОРМИРОВАНИЕ МНЕНИЙ И СОЦИАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ В СЕТЯХ С ЕСТЕСТВЕННЫМИ И ИСКУССТВЕННЫМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ¹

Царёв Д.В., Алоджанц А.П.

*Институт перспективных систем передачи данных,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
dmitriy_93@mail.ru, alexander_ap@list.ru*

Авдюшина А.Е.

*Факультет программной инженерии и компьютерной техники,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
avdushina98@gmail.com*

Аннотация. В работе предлагается новый квантовоподобный подход к исследованию распределенных интеллектуальных систем (РИС), состоящих из агентов искусственного (аватары) и естественного (пользователи) интеллекта, организованных в безмасштабную сеть. Продемонстрированы сложные особенности социального влияния в РИС, предполагающие формирование в сети лидеров мнений и их «топологическую» защиту. Выявлен эффект значительного сужения разброса мнений внутри сети, когда большинство владельцев занимает крайнюю позицию по обсуждаемому вопросу.

Ключевые слова: распределенный интеллект, искусственный интеллект, многоагентные системы, сложные сети.

Введение

Распределенный интеллект является краеугольным камнем междисциплинарной парадигмы организации современного общества на стыке искусственного интеллекта, робототехники, математики, информатики, физики и когнитивных наук [1]. В основе этой парадигмы лежат распределенные интеллектуальные системы (РИС), которые могут быть определены как агенты естественного интеллекта АЕИ – люди, пользователи – и агенты искусственного интеллекта (АИИ) – компьютерные программы, чат-боты, цифровые помощники, т. н. «аватары» и т. д. Исследование сложных взаимодействий АЕИ и АИИ в настоящее время представляет собой открытую проблему и актуальную задачу, решение которой необходимо, к примеру, для создания и развития Интернета вещей [2]. Недавно в работе [3] были экспериментально показаны нетривиальные особенности поведения комбинированных систем АЕИ (пользователей) и АИИ (аватаров), предложенная модель РИС представлена на рис. 1. Полученные в [3] результаты демонстрируют сложное поведение РИС, вызванное взаимодействием между агентами через сеть. Предложенная модель РИС состоит из набора пар пользователь-аватар, соединенных сетью аватар-аватар, нацеленной на максимизацию средней удовлетворенности пользователей взаимодействием со своими аватарами.

В данной работе предлагается физический подход, который может быть использован для описания такой системы, а также решения задачи повышения средней удовлетворенности пользователей. Подход основан на формализме квантового гамильтониана, применяемом к задачам принятия решений, см., например, [4]. В последнее время такой подход успешно используется при разработке эвристических алгоритмов для решения NP-сложных задач оптимизации [5].

В работе также используется подход социального лазера, предложенный в [3] (ср. с [6,7]), который применяется здесь для исследования свойств РИС. В основе этого подхода лежит идея формирования социально-значимого информационного поля в процессе общения агентов, которое может быть усилено за счет топологических особенностей сети. Как будет показано далее, предложенная в данной работе модель РИС может быть признана моделью социального воздействия (social impact model), демонстрирующей формирование узлов максимального влияния.

¹ Данная работа была профинансирована Министерством Науки и Высшего Образования Российской Федерации Госзадание № 2019-1339.

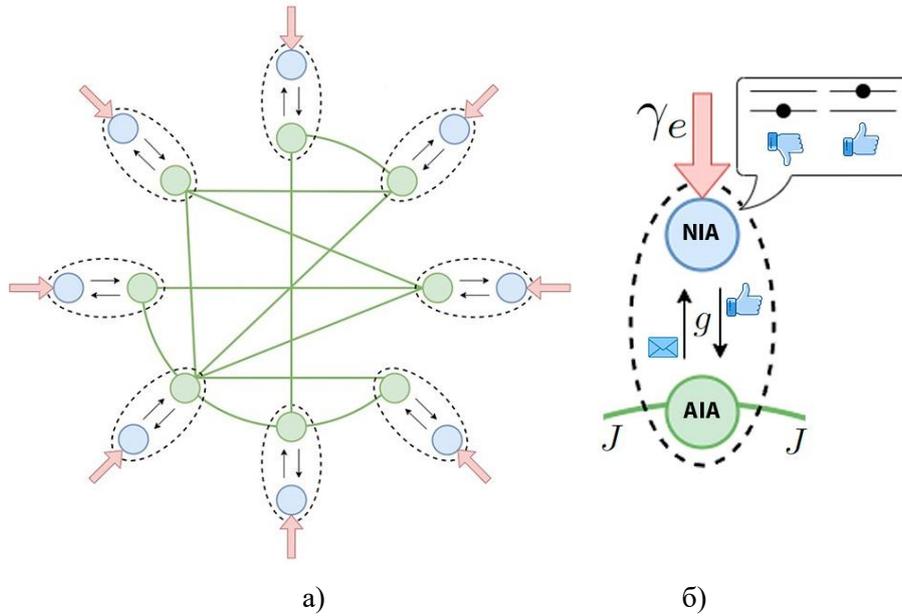


Рис. 1. (а) Схема модели распределенной интеллектуальной системы (РИС), (б) узел модели РИС, состоящий из агентов естественного (пользователи) и искусственного (аватары) интеллекта, связанных комплексной сетью. Остальные детали см. в тексте

1. Квантово-подобная модель РИС

1.1. Гамильтониан РИС

Модель РИС, предложенная в данной работе, изображена на рис. 1. Ее можно представить в виде комплексного неориентированного графа, см. рис. 2(а), имеющего N узлов со степенным законом распределения степеней узлов, $p(k) \propto e^{-\eta}$, где $\eta > 1$, см. рис. 2(б), ср. с [9]. Статистические свойства сети характеризуются первым моментом ($\langle k \rangle$) и нормированным вторым моментом (ζ), определяемыми как

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_j k_j = \frac{1}{N} \sum_{i,j} A_{ij}; \quad (1a)$$

$$\zeta \equiv \frac{1}{N \langle k \rangle} \sum_j k_j^2, \quad (1б)$$

где A_{ij} – симметричная матрица смежности. Предполагается, что пользователи (АЕИ) и их аватары (АИИ) расположены в узлах сети, см. рис. 1. Аватары могут получать и передавать информацию друг другу в рамках сети, в то время как пользователи связаны только со своими цифровыми помощниками, аватарами, и не могут общаться напрямую, см. рис. 1(а). Аватары предлагают своим владельцам информацию, полученную из сети, полагая ее актуальной и полезной для владельца. В свою очередь владельцы могут принять или отклонить эту информацию, см. рис. 1(б).

В рамках подхода социального лазера, информационные процессы в РИС можно описать следующим образом. Всякое социально-значимое сообщение представляет собой квант информации, т.н. s-фотон (см. [7]), рождаемый и поглощаемый пользователями через общение со своими аватарами. Элементарные процессы рождения и поглощения (уничтожения) s-фотона j -м пользователем описывается бозонными операторами рождения (\hat{a}_j^+) и уничтожения (\hat{a}_j), соответственно, где $j = 0, \dots, N$, ср. с [7]. Также полагается, что когнитивная структура пользователя проста и представляет собой двухуровневую квантовоподобную систему, см. рис. 1(б). Это приближение справедливо, если пользователи поставлены перед выбором некоторого решения типа «да» - «нет»; позицию «воздержался», которая также может быть актуальной, будем распознавать так же, как «нет», поскольку она не меняет ментального состояния пользователя. Таким образом, в случае неприятия информации от своего аватара, АЕИ остается в основном (эмоционально нейтральном) состоянии $|g\rangle$, характеризуемом социальной энергией E_g . В свою очередь, воспринимая информацию от аватара, АЕИ меняет свое состояние на возбужденное $|e\rangle$, обладающее энергией $E_e > E_g$. При этом $\hbar\Omega_0 = E_e - E_g$ представляет собой энергию перехода j -го АЕИ (для простоты полагаем ее одинаковой для всех j), а

Ω_0 есть частота (тематический окрас) порций информации, необходимой для того, чтобы АЕИ изменил свое мнение (далее везде будем полагать постоянную Планка $\hbar = 1$ для краткости записи).

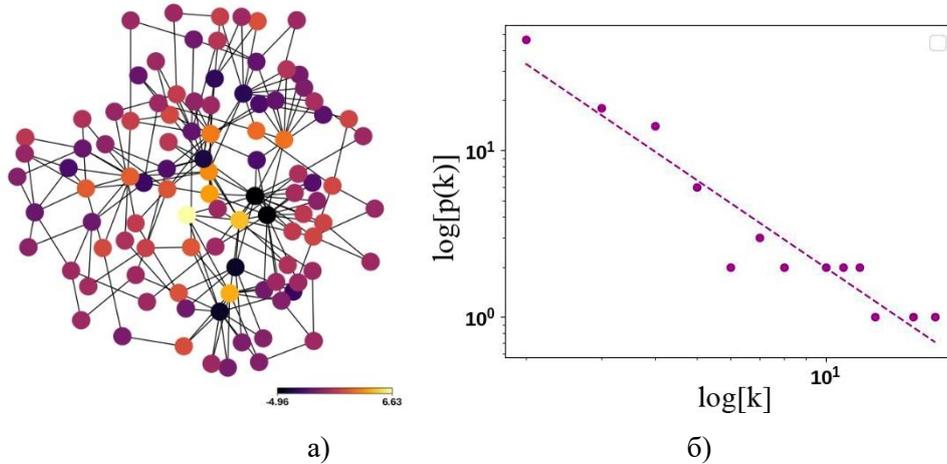


Рис. 2. (а) Комплексная сеть аватар-аватар, (б) распределение степени узлов в двойном логарифмическом масштабе, демонстрирующее степенной закон распределения $p(k) \propto e^{-\eta}$ с $\eta = 2.3$; $k_{min} = 2$; $k_{max} = 18$; $\langle k \rangle = 3.94$; $\zeta = 6.46$

Запишем квантовый гамильтониан РИС в виде

$$\hat{H} = \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{2} \Omega_0 \hat{\sigma}_j^z + \Omega_j \hat{a}_j^+ \hat{a}_j + g (\hat{a}_j \hat{\sigma}_j^+ + \hat{a}_j^+ \hat{\sigma}_j^-) \right] - \frac{J}{2} \sum_{i,j=1}^N A_{ij} (\hat{a}_i^+ \hat{a}_j + \hat{a}_j^+ \hat{a}_i), \quad (2)$$

где первые два слагаемых определяют свойства АЕИ и АИИ по отдельности, тогда как третье слагаемое описывает их взаимодействие; g характеризует силу этого взаимодействия. $\hat{a}_j^+ \hat{a}_j$ – оператор числа s -фотонов, соответствующий j -му аватару, и “окрашенных” частотой Ω_j . $\hat{\sigma}_j^z$ – оператор инверсии j -го владельца (значение этого оператора будет прояснено позднее); $\hat{\sigma}_j^+$ и $\hat{\sigma}_j^-$ – лестничные операторы, описывающие возбуждение и релаксацию j -го АЕИ как простой двухуровневой системы, ср. с [8]. Последнее слагаемое в (2) описывает взаимодействие (обмен информацией) между i -м и j -м аватарами в рамках сети ($J > 0$ – сила такого взаимодействия), описываемой элементом матрицы смежности A_{ij} .

1.2. Основные уравнения

Из гамильтониана (2) могут быть получены операторные уравнения Гейзенберга–Ланжевена. В данной работе ограничимся приближением среднего поля, что требует перехода к средним значениям соответствующих операторов. После некоторых расчётов получим систему уравнений

$$\dot{f}_j = (-i\Omega_j - \kappa_j) f_j - ig p_j + ij \sum_{i=1}^N A_{ij} f_i; \quad (3a)$$

$$\dot{p}_j = (-i\Omega_0 - \Gamma) p_j + ig \sigma_j f_j; \quad (3б)$$

$$\dot{\sigma}_j = (\gamma_e - \gamma_g) - (\gamma_e + \gamma_g) \sigma_j + 2ig (f_j^* p_j - f_j p_j^*), \quad (3в)$$

где $f_j = \langle \hat{a}_j \rangle$ – среднее информационное поле, установившееся в сети аватар-аватар; $p_j = \langle \hat{\sigma}^- \rangle$ характеризует социальную поляризацию (ср. [6,7]); $\sigma_j = \langle \hat{\sigma}_j^z \rangle$ – среднее значение оператора инверсии. В (3) Γ – скорость затухания возбуждения АЕИ (для простоты примем эту скорость одинаковой для всех АЕИ). Информация в РИС также может быть потеряна: κ_j в (3) характеризует такие потери информации в j -м узле, их можно понимать как s -фотоны, воспринятые аватаром, но не пользователем. Параметры γ_e и γ_g в (3) регулируют среднюю населенность АЕИ на основном и возбужденном уровнях вне обмена информацией с аватарами: всякий владелец аватара может спонтанно расслабиться до эмоционально основного состояния $|g\rangle$ со скоростью γ_g . С другой стороны, владельцы аватаров могут получать информацию извне через взаимодействие с окружающей средой, ср. с [6]. При этом, в рамках парадигмы социального лазера, необходима информационная накачка, см. рис. 1(б) и [7]. Сильная

информационная накачка способна возбудить АЕИ в состояние $|e\rangle$ с одинаковой для всех скоростью γ_e .

Уровень удовлетворенности владельцев своими аватарами в (3) можно оценить для РИС как целого через среднюю инверсию σ , определяемую в виде

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sigma_j. \quad (4)$$

Таким образом, при $\sigma = 1$, владельцы аватаров в среднем положительны и удовлетворены. При $\sigma = -1$ владельцы эмоционально нейтральны и, возможно, недовольны своими аватарами. Значение $\sigma = 0$ указывает на равное распределение удовлетворенных и неудовлетворенных владельцев. Следовательно, можно обозначить σ как суммарное (макроскопическое, коллективное) мнение АЕИ об информационных полях, циркулирующих в сети. Стоит отметить, что инверсию σ и (суммарную) социальную поляризацию $p = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_j$ также можно трактовать как валентность и эраузал (возбуждение), характеризующие коллективные эмоции в сети, вызванные взаимодействием АЕИ с информационным полем аватаров, ср. с [6].

В данной работе положим инверсию населенностей фиксированной, что соответствует стационарному решению (3в) $\dot{\sigma}_j = 0$. Уровень удовлетворенности владельцев своими аватарами в уравнениях (3) для РИС как целого можно оценить с помощью средней инверсии как

$$\sigma \simeq \sigma_j = \frac{\gamma_e - \gamma_g}{\gamma_e + \gamma_g}. \quad (5)$$

Таким образом, при заданном значении σ можно отслеживать социальную поляризацию и s-поле, что можно считать пределом социального влияния, происходящего в рамках РИС с помощью АИИ через сеть, ср. с [10]. Далее сосредоточимся на пределе $\sigma \simeq \sigma_j$ и $0 \leq \sigma \leq 1$; рассмотрим стационарные решения уравнений (3): $p_j(t) = p_j e^{-i\Omega_0 t - i\omega t}$ и $f_j(t) = f_j e^{-i\Omega_0 t - i\omega t}$, что даст частоту эволюции АЕИ и информационного поля в сети ω . Подставив $p_j(t)$ и $f_j(t)$ в (3), получим

$$(\omega - \Delta_j + i\kappa_j)f_j - gp_j + J \sum_{i=1}^N A_{ij}f_i = 0; \quad (6a)$$

$$(i\Gamma + \omega)p_j + g\sigma_j f_j = 0, \quad (6b)$$

где $\Delta_j = \Omega_j - \Omega_0$ – отстройка, характеризующая эффективность взаимодействия j -го АЕИ с социально значимым информационным полем, обеспечиваемым аватаром. Предел $|\Delta_j| \gg g$ соответствует нерезонансному взаимодействию АЕИ с s-полем, в этом случае вероятность возбуждения АЕИ быстро исчезает, а мотивация людей к изменению своего основного ментального состояния достаточно низка. В дальнейшем будем полагать $|\Delta_j| < g$ для всех $j = 1, \dots, N$.

Выразив из (6б) поляризацию p_j и подставив ее в (6а), получим

$$\{(\omega - \Delta_j + i\kappa_j)(\omega + i\Gamma) + \sigma\}f_j + J(\omega + i\Gamma) \sum_{i=1}^N A_{ij}f_i = 0, \quad (7)$$

где ω , Δ_j , κ_j , Γ и J считаем нормированными на g .

Уравнение (7) описывает формирование стационарного s-поля в РИС, поддерживаемого взаимодействием аватар-аватар и некоторой разностью населенностей пользователей σ . В общем случае характерная частота такого поля ω является комплексной. Мнимая часть ω описывает потери информационного поля при $\text{Im}[\omega] < 0$, тогда как при $\text{Im}[\omega] > 0$ происходит его усиление. Условие $\text{Im}[\omega] = 0$ перехода от затухания s-поля к усилению является здесь основным при исследовании феномена социального влияния в сети.

2. Численный анализ

2.1. Связанные состояния АЕИ-АИИ

Рассмотрим сперва важный предел уравнения (7), когда j -я пара АЕИ-АИИ остается изолированной от сети, т.е. соответствующие матричные элементы $A_{ij} = 0$. В таком случае из (7) получим уравнение

$$\omega_{1,2} = -i\xi_{\pm,j} + \frac{1}{2} \left(\Delta_j \pm \sqrt{(\Delta_j - 2i\xi_{-,j})^2 - 4\sigma} \right), \quad (8)$$

которое математически определяет высокие (ω_1) и низкие (ω_2) частоты двух линейно связанных осцилляторов; $\xi_{\pm,j} \equiv (\kappa_j \pm \Gamma)/2$. В квантовой физике такие выражения описывают поляритоны верхней и нижней ветвей, которые представляют собой квазичастицы, наполовину вещество (двухуровневая система), наполовину свет (фотон), образующиеся в среде, ср. с [11]. В данном же случае пары АЕИ-АИИ представляют собой связанные состояния пользователя-аватара – “s-поляритоны”, образующиеся в среде РИС. Сильная связь АЕИ-АИИ может характеризоваться вещественными $\omega_{1,2}$, когда потери информации и скорость релаксации исчезающе малы. При достаточно высоких $\xi_{\pm,j}$ пары АЕИ-АИИ разрушаются, что означает слабую связь между пользователем и его аватаром.

2.2. Свойства сети аватар-аватар

Основные свойства комплексной сети аватар-аватар можно выяснить из спектра матрицы смежности A_{ij} . В частности, этот спектр обладает так называемым собственным значением Перрона (СЗП) – ярко-желтый узел, расположенный вблизи центра сети на рис. 2(а). СЗП положительно, его значение лежит в пределах $[\langle k \rangle, k_{max}]$, ср. с [12]. Важно отметить, второе СЗП отрицательно, см. черные узлы на рис. 2(а).

Для численного анализа РИС воспользуемся уравнениями (6). Пусть Δ_j и κ_j – случайные величины, равномерно распределенные в пределах $\Delta \in [-1; 1]$ и $\kappa_j \in [0.2; 0.3]$. Для комплексной сети, изображенной на рис. 2 были получены собственные значения частот s-поля; на рисунке 3 изображены зависимости мнимых частей этих частот от их действительных частей. Как и следовало ожидать из уравнений (8), верхняя ветвь решений на рис. 3 (синие точки), описывающая собственные значения s-поля f_j , соответствует ω_1 . Нижняя ветвь (красные точки) характеризует собственные значения социальной поляризации p_j . СЗП отмечено жирной точкой в левой части рисунка 3 (действительная часть соответствующей частоты отрицательна, так как A_{ij} в гамильтониане (2) присутствует с минусом).

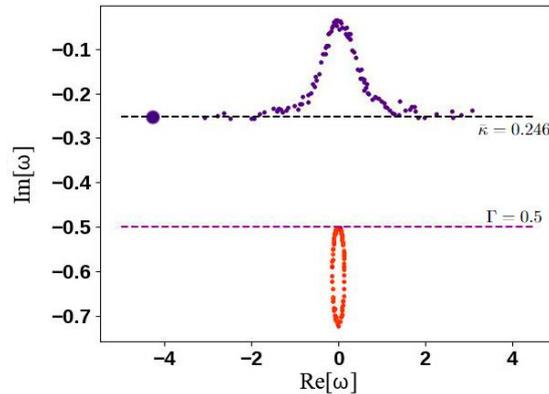


Рис. 3. Зависимость мнимых частей собственных частот сети аватар-аватар РИС от их действительных частей при $N = 100$, $J = 0.6$, $\Gamma = 0.5$; $\Delta \in [-1; 1]$ и $\kappa_j \in [0.2; 0.3]$ являются случайными равномерно распределенными величинами. Жирная синяя точка указывает на СЗП

2.3. Анализ социального влияния

С точки зрения систем распределенного интеллекта узел СЗП соответствует самому влиятельному лидеру мнений в сети. Примечательно, что узел СЗП не обязательно является хабом, т. е. узлом с наибольшим числом связей, образуемых с другими узлами, как это имеет место для безмасштабной сети на рис. 2(а). Например, случайные сети не имеют хабов, но тем не менее узел с СЗП в них присутствует. Во всех случаях он возникает вследствие ненулевого среднего значения s-поля

$$\bar{f} = \frac{1}{N\langle k \rangle} \sum_{j=1}^N k_j f_j, \quad (9)$$

где $k_j = \sum_i A_{ij}$ – степень j -го узла.

Чтобы исследовать СЗП, рассмотрим приближение отожденной сети $A_{ij} = \frac{k_i k_j}{N\langle k \rangle}$, ср. с [7]. Подставляя A_{ij} в (7) и решая относительно f_j , получим

$$f_j = -\frac{J(\omega_p + i\Gamma)k_j \bar{f}}{(\omega_p - \Delta_j + i\bar{\kappa})(\omega_p + i\Gamma) + \sigma}, \quad (10)$$

где $\bar{\kappa}$ – средняя скорость потерь s-поля; ω_p – это СЗП. Уравнение (10) означает, что s-поле в j -м узле, содержащем пару АЕИ-АИИ и соответствующем СЗП, полностью определяется средним полем, наведенным сетью аватар-аватар. Это означает либо лидера мнений сети, либо, наоборот, узел коллективного давления, на котором все сообщество сосредотачивает свое влияние. Подставляя (10) в (9), получим

$$\omega_{p,1} = -J\bar{\zeta} - i\bar{\kappa}; \quad (11a)$$

$$\omega_{p,2} = -i\Gamma. \quad (11b)$$

где для простоты положено $\sigma \simeq 0$. уравнения (11) хорошо согласуются с численными результатами на рис. 3: $\text{Im}[\omega_{p,1}]$ и $\text{Im}[\omega_{p,2}]$ соответствуют штриховым линиям.

Теперь рассмотрим точки на рис. 3, расположенные вдоль прямой $\text{Im}[\omega] = -\bar{\kappa}$, для которых $f_i \simeq f_j$ для всех i и j . Последнее допущение справедливо, поскольку матрица смежности A_{ij} обладает большим (по модулю) СЗП, по сравнению с другими собственными значениями, см. [12]. В эту группу попадают как лидеры мнений, так и владельцы хабов. Тогда из (7) и (10) получаем

$$\omega_{1,2} = -\xi_{\pm} + \frac{1}{2} \left(\Delta_j \pm \sqrt{(\Delta_j - 2i\xi_{\pm})^2 - 4\sigma} \right), \quad (12)$$

где были введены обозначения $\xi_{\pm} \equiv \frac{(\bar{\kappa} \pm \Gamma)}{2}$, $\Delta_j \equiv \Delta_j - Jk_j$. Далее положим $|\Delta_j| \simeq Jk_j \gg \sqrt{(k_j - \Gamma)^2 + 4\sigma}$, т. е. положим, что значение Jk_j достаточно велико. Тогда из (12) получим (ср. с (11))

$$\omega_{p,1} = -Jk_j + \frac{\sigma}{Jk_j} - i\bar{\kappa}; \quad (13a)$$

$$\omega_{p,2} = -\frac{\sigma}{Jk_j} - i\Gamma, \quad (13b)$$

что также хорошо согласуется с результатами численного расчета, представленными на рис. 3.

Рассмотрим теперь точки, расположенные на рис. 3 в узкой (вертикальной) полосе $-1 < \text{Re}[\omega] < 1$. В ней находятся две близко расположенные группы точек в верхней и нижней частях рис. 3, соответствующие основному набору собственных значений уравнений (6) и собственным значениям матрицы смежности A_{ij} , ср. с [12]. Главной особенностью этих частот является их способность “притягиваться” друг к другу в следствие неэрмитовости матрицы, описывающей стационарные состояния для уравнений (6), ср. с [13]. Такая неэрмитовая локализация существенно влияет на спектральные кривые.

Моды, описываемые точками в верхней части рис. 3, первыми стремятся войти в полуплоскость, где $\text{Im}[\omega] > 0$. Их “подвижность” определяется топологией графа: эти узлы обладают малым количеством связей, будучи менее значимыми при формировании мнений узлами на периферии сети, см. рис. 2(a). Чтобы найти частоты точек вблизи $\omega = 0$, рассмотрим уравнения (12) при условии, что $\Delta_j \simeq \Delta_j - Jk_{min}$, где k_{min} — минимальное значение степени вершины графа. Численный расчет показывает, что усиление s-поля происходит при попадании точек в верхней части рис. 3 в полуплоскость действительных собственных значений, что определяется условием

$$\sigma \simeq \bar{\kappa}\Gamma. \quad (14)$$

Если одновременно с этим выполняются неравенства $|\Delta_j| \xi_{\pm}, \Delta_j^2, \xi_{\pm}^2 \ll 1$, тогда из (12) и (14) можно получить

$$\omega_{p,1} = \frac{\Delta_j}{2}; \quad (15a)$$

$$\omega_{p,2} = \frac{\Delta_j}{2} - 2i\xi_{\pm}, \quad (15b)$$

т. е. частота ω_1 становится действительной. Примечательно, уравнение (14) можно также назвать условием перехода к социальному лазеру, предполагающего усиление социального поля [7].

На рис. 4 показаны $\text{Re}[\omega]$ и $\text{Im}[\omega]$ как функции логарифма инверсии населенностей $\log[\sigma]$. Как видно из рис. 4(а), самая нижняя синяя кривая соответствует СЗП, $\text{Re}[\omega_{p,1}]$ и незначительно меняется с ростом σ . При этом верхние кривые на рис. 4(а) относятся к владельцам хабов, которым соответствуют крайние правые точки на рис. 3 и наиболее влиятельные узлы (черные точки) на рис. 2(а). Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее влиятельные узлы РИС склонны сохранять свою позицию независимой. Другими словами, они оказываются “топологически защищенными”.

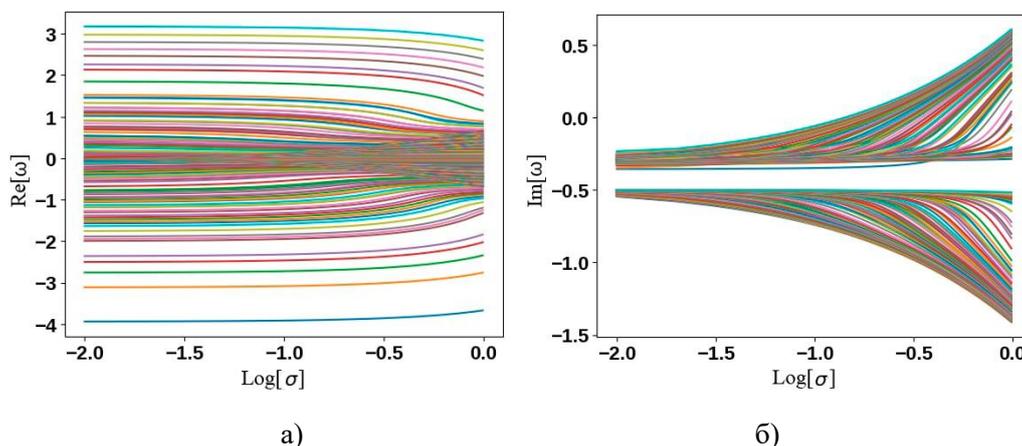


Рис. 4. (а) Действительная и (б) мнимая части собственных частот безмасштабной сети РИС в зависимости от логарифма инверсии населенностей $\log[\sigma]$. Использованы те же параметры, что и для рис. 3

С другой стороны, как видно из рис. 4(а), собственные частоты точек внутри области $-1 < \text{Re}[\omega] < 1$ (см. рис. 3) начинают сближаться навстречу друг другу с ростом σ , что демонстрирует т. н. эффект стягивания частоты. Этот эффект предполагает заполнение соответствующими кривыми узкой области рис. 4(а), близкой к значению $\omega \approx 0$, что означает совпадение частоты s-поля и частоты перехода АЕИ, Ω_0 . Практически это означает, что разброс мнений в сети заметно сужается по мере того, как значительное большинство пользователей формируют свою позицию с ростом σ .

Мнимые части собственных частот $\text{Im}[\omega]$ построены на рис. 4(б) в зависимости от логарифма инверсии населенностей $\log[\sigma]$. Разделение кривых и рост верхней ветви свидетельствует о значительном усилении “основного” мнения (область, где $\text{Im}[\omega] > 0$) с ростом σ .

5. Заключение

В данной работе были изучены основные свойства распределенных интеллектуальных систем, организованных в виде безмасштабной сети цифровых аватаров, предоставляющих информацию своим пользователям. Когда пользователи (в среднем) довольны своими аватарами, возникает эффект стягивания частоты; это означает, что темы обсуждения стягиваются к тем, которые интересны большинству. В этом случае информационное поле для одних тем в сети может усиливаться, а для некоторых других, второстепенных - подавляться, что может быть также распознано как формирование эхо-камеры. Лидеры мнений, наиболее влиятельные участники сети, оказываются мало затронуты этим эффектом, сохраняя интересующие их темы практически неизменными. Полученные результаты могут быть полезны для выявления поведения многоагентных систем, а также коллективных эффектов, возникающих в сетях.

Литература

1. Heylighen F. Distributed Intelligence Technologies: present and future applications // The future information society: Social and technological problems. 2017. P. 179-212.
2. Alsbouhi T., Qin Y., Hill R., Al-Aqrabi H. Distributed Intelligence in the Internet of Things: Challenges and Opportunities // SN Computer Science. 2021. Vol. 2. p. 277.
3. Guleva V., Shikov E., Bochenina K., Kovalchuk S., Alodjants A., Boukhanovsky A. Emerging Complexity in Distributed Intelligent Systems // Entropy. 2020. Vol. 22. p. 1437.

4. *Bagarello F., Basieva I., Khrennikov A.* Quantum field inspired model of decision making: Asymptotic stabilization of belief state via interaction with surrounding mental environment // *Journal of Mathematical Psychology*. 2018. Vol. 82. P. 159-168.
5. *Lucas A.* Ising formulations of many NP problems // *Front. Phys.* 2014. Vol. 2. P. 5.
6. *Tsarev D., Trofimova A., Alodjants A., Khrennikov A.* Phase transitions, collective emotions and decision-making problem in heterogeneous social systems // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. P. 18039.
7. *Alodjants A. P., Bazhenov A. Y., Khrennikov A. Y., Bukhanovsky A. V.* Mean-field theory of social laser // *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. P. 8566.
8. *Scully M. O., Zubairy M. S.* Quantum optics. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
9. *Newman M.* Networks. Oxford: Oxford University Press, 2018.
10. *Holyst J. A., Kacperski K., Schweitzer F.* Phase-transitions in social impact models of opinion formation // *Physica A*. 2000. Vol. 285. P. 199-210.
11. *Pau S., Bjork G., Jacobson J., Cao H., Yamamoto Y.* Microcavity exciton-polariton splitting in the linear regime // *Phys. Rev. B*. 1995. Vol. 15. P. 14437.
12. *Sarkar C., Jalan S.* Spectral properties of complex networks // *Chaos*. 2018. Vol. 28.
13. *Feinberg J., Zee A.* Non-Hermitian localization and delocalization // *Phys. Rev. E*. 1999. Vol. 59. P. 6433.