

СЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОРТФЕЛЯ ЗАКАЗОВ

К.А. Сухачев, А.В. Цветков¹

(Институт проблем управления РАН, Москва)

Введение. Настоящая работа посвящена рассмотрению моделей возникновения сетевых организационных структур – совокупности связей между равноправными агентами, совместно выполняющими портфель заказов. Структура изложения следующая – сначала проводится краткий обзор основных подходов к моделированию сетевых структур, затем рассматривается модель образования связей между агентами, и, наконец, модель возникновения веерной структуры.

Сетевые структуры. В качестве типовых структур организационных систем (ОС) в [11] выделены следующие. Во-первых, это – вырожденная структура (ВС), в которой отсутствуют какие-либо связи между участниками. Во вторых, это – линейная структура (ЛС), при которой подчиненность участников ОС имеет вид дерева, то есть каждый участник подчинен одному и только одному участнику следующего (более высокого) уровня иерархии (следует отметить, что в подавляющем большинстве работ, содержащих формальные модели управления организационными системами, рассматривались модели ОС, характеризуемые именно древовидными структурами). И, наконец, в третьих, это – матричная структура (МС), в которой некоторые участники ОС могут быть подчинены одновременно нескольким участникам, находящимся либо на одном и том же (более высоком), либо на различных, уровнях иерархии (соответственно, так называемое двойное подчинение, межуровневое взаимодействие и распределенный контроль [13]).

Если типовые структуры отражают статические характеристики ОС, то для описания их изменений во времени целесообразно введение понятия сетевой структуры (СС), в которой потенциально существуют связи между всеми участниками, некоторые из которых актуализируются, порождая из ВС линейную или матричную, на время решения стоящей перед системой задачи, а затем разрушаются (возвращаясь к ВС) до момента появления новых задач. То

есть, сетевые структуры – это такие структуры ОС, в которых могут возникать и двойное подчинение, и межуровневое взаимодействие, причем одни и те же субъекты могут выступать как в роли управляющих органов, так и в роли управляемых агентов, то есть вступать в сетевое взаимодействие [11]. Образно говоря, сетевая структура – набор априори равноправных агентов, в котором могут возникать временные иерархические и другие структуры, определяемые решаемыми системой задачами.

Упорядоченность взаимодействия и механизм управления (иерархия) возникает в сетевой структуре в результате необходимости специализации, позволяющей эффективно решать частные задачи. Например, в процессе многократного решения схожих задач ЛС возникает в СС как механизм снижения транзакционных издержек. Другими словами, разнообразие решаемых задач порождает в вырожденной структуре организационные системы как временные иерархии. Следовательно, тип структуры ОС, обнаруживаемый исследователем, зависит от времени наблюдения – на больших (по сравнению с характерным временем изменения внешних условий) временных промежутках ОС может рассматриваться как сеть, на малых – как имеющая одну из типовых структур – ВС, ЛС или МС.

В большинстве моделей теории активных систем [3], теории иерархических игр [4] и других разделов теории управления социально-экономическими системами подчиненность участников ОС считается заданной. В работах по экономике и менеджменту обсуждаются преимущества и недостатки различных организационных структур, в том числе – сетевых, но формальные задачи синтеза оптимальных структур даже не упоминаются. В многочисленных работах, посвященных задачам оптимизации иерархических структур (см. обзор в [8]), практически не учитывается характерная для участников ОС целенаправленность поведения, либо исследуется взаимодействие агентов с фиксированными ролями, находящихся на различных уровнях иерархии. Первое замечание справедливо и для чрезвычайно популярных на сегодняшний день программных многоагентных систем – см. обзор [6].

Опишем различие между «ролями» участников ОС. Целенаправленное (активное) поведение в теории управления обычно описывается в рамках теоретико-игровых моделей [9]. Качественное отличие иерархических игр [4, 9] от «обычных» неантагони-

¹ Статья написана совместно с Д.А. Новиковым.

стических игр заключается в наличии упорядочения участников ОС по последовательности выбора стратегий (напомним, что стратегией агента называется правило выбора им действий в зависимости от информации, имеющейся на момент осуществления выбора). Традиционно считается, что управляющий орган – центр – обладает правом первого хода, то есть, выбирает свою стратегию первым и сообщает ее другим участникам системы – управляемым субъектам – агентам.

В зависимости от того, может ли центр рассчитывать на то, что ему станет известно действие агента, он может выбирать свою стратегию либо как в «обычной» игре (то есть в виде отображения имеющейся у него информации во множество действий), либо в виде «функции» от выбора второго агента [4] (то есть в виде отображения имеющейся у него информации во множество функций, отображающих множество действий второго агента во множество действий первого), либо в более сложной форме – см. метаигры в [9]. Тем самым первый агент превращается в *метаагента*, устанавливающего «правила игры» для остальных агентов (проявление отношения власти [10]). Таким образом, критерием отнесения конкретного участника, например, двухуровневой ОС к множеству управляющих органов или к множеству управляемых субъектов является его приоритет в последовательности выбора стратегий и возможность выбирать в качестве своей стратегии «функцию» от действий (или в более общем случае – стратегий) агентов, имеющих более низкий приоритет [11].

Например, если в некоторой ОС участники принимают решения последовательно, и имеются три «момента» принятия решений, то можно условно рассматривать данную ОС как трехуровневую иерархическую систему. Участники, делающие первый ход, при этом интерпретируются как центры верхнего уровня иерархии (метацентры), участники, делающие второй ход, интерпретируются как центры промежуточного уровня (центры), а участники, выбирающие свои действия последними – как управляемые субъекты (активные элементы [3]). Стратегии метацентров могут быть функциями от стратегий центров промежуточного уровня и управляемых субъектов и т.д.

Следовательно, в рамках теоретико-игровой модели иерархическая структура ОС порождается фиксацией последовательности

выбора стратегий, свойств множеств допустимых действий и информированности участников.

Таким образом, в процессе сетевого взаимодействия каждый из его участников в общем случае может выступать в роли центра того или иного уровня иерархии. Фактическая роль участника определяется двумя факторами. Первый фактор заключается во влиянии имеющегося отношения власти, то есть институциональной возможности определенного участника выступать в той или иной роли. Второй фактор заключается в целесообразности (эффективности, в том числе и экономической) этой роли, как с точки зрения самого участника, так и с точки зрения других участников (причем в моделях горизонтальной «интеграции» должны рассматриваться все рациональные комбинации потенциальных участников ОС).

Фиксируем экзогенно заданное отношение власти и рассмотрим эффективность различных распределений ролей между участниками ОС. Другими словами, предположим, что имеются несколько агентов (участников ОС), каждый из которых может выбирать свои стратегии в определенные моменты времени и в зависимости от принятой последовательности выбора стратегий делать свое действие зависящим от стратегий участников, осуществляющих выбор позже него. Получаем метаигру с переменным составом агентов (который в свою очередь подлежит определению) – игру, в которой определяются роли участников (будем считать, что их выигрыши при каждом фиксированном распределении ролей могут быть вычислены).

Подробное исследование теоретико-игровых моделей структурного синтеза проведено в работе [11]. Полученные в ней результаты можно разделить на несколько классов. Основным качественным результатом является осознание соответствия между структурой организационной системы и типом игры, которой описывается взаимодействие участников системы, а также вытекающая из этого соответствия формулировка задачи структурного синтеза как задачи поиска оптимальной (в смысле критерия эффективности, определенного на множестве состояний агентов, являющихся равновесиями их игры при данной структуре) структуры, или, что тоже самое – поиска оптимального распределения ролей

между агентами. «Количественные», то есть формальные, результаты относятся к:

- характеристики решений задач структурного синтеза (для веерных структур, линейных ОС, структур с побочными платежами, а также для ОС, агенты которых характеризуются ограниченной рациональностью и для задач последовательного синтеза);

- получению условий, при которых равновесное состояние агентов в той или иной степени не зависит от структуры;

- собственно решению задач структурного синтеза (для однородных ОС, для двухуровневых ОС, для ОС с побочными платежами, а также для ОС, агенты которых характеризуются ограниченной рациональностью);

- исследованию задач формирования сетевых структур для ряда прикладных моделей (модель внутренних цен, модель размещения производственного заказа и модель управления проектом).

Модель реализации портфеля заказов. Рассмотрим множество $N = \{1, 2, \dots, n\}$ агентов, каждый из которых может реализовать множество $M = \{1, 2, \dots, m\}$ операций (работ). Обозначим: L_{ik} – ограничение сверху на объем k -ой работы, который может выполнить i -ый агент; c_{ijk} – затраты на выполнение единичного объема k -ой работы j -ым агентом для i -го агента (сколько i -ый агент должен заплатить j -му агенту, $j \neq i$); $q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in})$ – внешний заказ i -му агенту, где q_{ik} – объем k -ой работы; H_i – стоимость i -го заказа, $i, j \in N, k \in M$; $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – портфель заказов.

Введем следующие предположения:

$$(1) c_{iik} \leq \min_{j \in N} c_{ijk}, i \in N, k \in M,$$

то есть выполнять любую работу "из своего заказа" любому агенту дешевле самому, нежели чем заказывать ее у другого агента;

$$(2) \sum_{k \in M} c_{iik} q_{ik} \leq H_i, i \in N,$$

то есть без учета ограничений на максимальные объемы работ самостоятельное выполнение заказа выгодно всем агентам;

$$(3) \sum_{i \in N} L_{ik} \leq \sum_{i \in N} q_{ik}, k \in M,$$

то есть с точки зрения технологических ограничений портфель заказов реализуем данным набором агентов.

Введем $n \cdot m$ переменных x_{ijk} – объем k -ой работы, выполняемой j -ым агентом для i -го агента (величину x_{iik} можно считать собственным объемом k -ой работы i -го агента), $i, j \in N, k \in M$. Тогда условие выполнения портфеля заказов можно записать в виде:

$$(4) \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq q_{ik}, i \in N, k \in M,$$

где

$$(5) \sum_{i \in N} x_{ijk} \leq [0; L_{jk}], j \in N, k \in M.$$

Целевую функцию i -го агента можно определить как разность между его доходом (стоимостью его заказа) и затратами на собственные работы, плюс платежи со стороны других агентов за выполненные для них работы:

$$(6) f_i(x) = H_i - \sum_{k \in M} [\sum_{j \in N} c_{ijk} x_{ijk} - \sum_{j \in N} (c_{jik} - c_{iik}) x_{jik}], i \in N,$$

где $x = \|x_{ijk}\|$.

Если считать, что каждый агент может отказаться участвовать в выполнении заказов и получить нулевой выигрыш (доход и затраты агента в случае его отказа от участия в выполнении заказов будем считать равными нулю), то условие участия примет вид:

$$(7) f_i(x) \geq 0, i \in N.$$

Так как агенты активны, то рассмотрим задачу максимизации суммы целевых функций всех агентов при условии, что весь портфель заказов выполняется, причем выполняется всем коллективом агентов. Задача максимизации суммы целевых функций (6) после несложных преобразований (с учетом того, что при выполнении портфеля заказов сумма доходов агентов постоянно) примет вид:

$$(8) \sum_{i, j \in N} \sum_{k \in M} c_{iik} x_{jik} \stackrel{\text{R}}{\min}_{\{x\} \in \{(4), (5), (7)\}}.$$

Можно также сформулировать n задач поиска наиболее выгодного с точки зрения каждого из агентов распределения объемов работ:

$$(9) \sum_{k \in M} [\sum_{j \in N} c_{ijk} x_{ijk} - \sum_{j \in N} (c_{jik} - c_{iik}) x_{jik}] \textcircled{R} \min_{\{x | (4), (5), (7)\}} , j \in \hat{I} N.$$

Задачи (8) и (9) являются задачами линейного программирования². Если $m = 1$, то без учета условий участия получим аналог транспортной задачи [1]. Если на выполняемые агентами или заказываемые работы наложены ограничения снизу или ограничения комплектности, то получим более сложную задачу – задачу дискретной оптимизации [1]).

Особенно просто решается без учета условия участия задача (8). Ее оптимальное решение таково: для каждой работы упорядочиваем агентов в порядке возрастания "собственных" затрат, а затем загружаем их по-максимуму, начиная с первого, до тех пор, пока не будет выполнен суммарный заказ по рассматриваемой работе.

Обозначим X_0 – множество решений задачи (8), X_j – множество решений j -ой задачи в системе задач (9). Если рассмотреть кооперативную игру с нетрансферабельной полезностью [9], в которой j -ый агент выбирает $\|x_{ijk}\|_{i \in \hat{I} N, k \in \hat{I} M}$, то достаточное условие непустоты S -ядра этой игры дается следующим утверждением:

Утверждение 1. Для возможности полного согласования интересов агентов достаточно выполнения следующего условия:

$$(10) \prod_{j \in N} X_j \subset X_0 \neq \emptyset.$$

Отметим, что имеет место следующая система соотношений:

$$" i \in \hat{I} N, " x^i \in X_i, " x^0 \in X_0 \sum_{j \in N} f_j(x^i) \leq \sum_{j \in N} f_j(x^0).$$

Если допустить возможность передачи полезности между агентами, то получим игру с трансферабельной полезностью [9], кроме того, рассматриваемую задачу можно интерпретировать и как задачу формирования торговой сети [7].

Трансфертная цена. Рассмотрим в рамках описанной выше модели задачу определения системы трансфертных цен $(I_k)_{k \in \hat{I} M}$, по

² Отметим, что по аналогии с (8) и (9) можно рассматривать задачу поиска минимальных ограничений на объемы работ, при которых портфель заказов реализуем, и другие задачи.

которым агенты могут обмениваться соответствующими ресурсами.

Ограничения (4) и (5) не изменятся, а целевая функция i -го агента примет вид:

$$(11) f_{i,i}(x) = H_i + \sum_{k \in M} [(I_k - c_{iik}) \sum_{j \in N} x_{jik} - I_k \sum_{j \in N} x_{ijk}], i \in \hat{I} N.$$

Условие участия примет вид:

$$(12) f_{i,i}(x) \geq 0, i \in \hat{I} N.$$

Задача максимизации суммы целевых функций (11) примет вид:

$$(13) \sum_{i, j \in N} \sum_{k \in M} c_{iik} x_{jik} \textcircled{R} \min_{\{x | (4), (5), (12)\}} ,$$

а также n задач поиска наиболее выгодного с точки зрения каждого из агентов распределения объемов работ:

$$\sum_{k \in M} [(I_k - c_{iik}) \sum_{j \in N} x_{jik} - I_k \sum_{j \in N} x_{ijk}] \textcircled{R} \min_{\{x | (4), (5), (12)\}} , j \in \hat{I} N.$$

Отметим, что целевые функции в задачах (8) и (13) совпадают. Ограничения (4) и (5) в этих задачах одинаковы, отличие состоит лишь в ограничениях (7) и (12).

Обозначим

$$L = \{I = (I_1, I_2, \dots, I_m) / \exists x \in \hat{I} (4) \cap (5) \cap (12)\}.$$

Из (13) следует, что, если $L \neq \emptyset$, то существует система трансфертных цен, максимизирующая сумму целевых функций всех агентов.

Пусть $\|x_{ijk}^0(I)\|$ – решение задачи (13) при системе трансфертных цен $I \in L$. Тогда из (11) следует, что для i -го агента наиболее выгодны цены из множества

$$L_i = \text{Arg} \max_{I \in \Lambda} \sum_{k \in M} I_k \sum_{j \in N} (x_{jik}^0(I) - x_{ijk}^0(I)), i \in \hat{I} N.$$

Получаем, что справедливо следующее утверждение.

Утверждение 2. Для существования системы трансфертных цен, полностью согласованной с интересами агентов, достаточно выполнения следующего условия: $\prod_{j \in N} \Lambda_j \neq \emptyset$.

Итак, выше описана задача распределения работ между агентами при реализации одного портфеля заказов. Если перейти к

анализу потока портфелей заказов, то исследование выгодности установления долговременных связей между агентами можно производить по аналогии с тем, как это делалось в [5].

Синтез веерной структуры. Выше при рассмотрении модели реализации портфеля заказов предполагалось, что все агенты равноправны. Предположим теперь, что рассматриваются варианты назначения одного из агентов центром, то есть перехода от вырожденной структуры к веерной. Содержательная интерпретация подобной модели такова: заказчик, которому необходимо реализовать портфель заказов, может обратиться к любому из n агентов, каждый из которых (став центром) назначит систему цен, наиболее выгодную для него среди тех цен, которые максимизируют сумму целевых функций всех агентов и обеспечивают выполнение условия участия для каждого из них. Очевидно, что заказчику следует обратиться к тому из агентов, кто, став центром, выберет такую систему цен, которая обеспечит заказчику минимум суммарных затрат на выполнение портфеля заказов.

В условиях благожелательности агентов к заказчику (из всех систем цен, обеспечивающих ему одинаковую полезность, агент выберет такую систему цен, которая наиболее выгодна для заказчика) получаем, что с точки зрения заказчика наиболее эффективно обратиться к агенту из следующего множества:

$$\text{Arg} \min_{i \in N} \min_{I_{ik} \in \Lambda_i} \sum_{j \in N} \sum_{k \in M} I_{ik} q_{jk}.$$

Заключение. Рассмотренные в настоящей работе сетевые модели реализации портфеля заказов характеризуются достаточно высокой сложностью (особенно проверка условий согласования в утверждении 2 и поиск оптимального назначения центра в веерной структуре). Поэтому перспективным направлением будущих исследований представляется рассмотрение упрощений аналогичных моделей, которые допускали бы анализ зависимости свойств оптимального решения от параметров модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2001.

2. Бурков В.Н., Кузнецов Н.А., Новиков Д.А. Механизмы управления в сетевых структурах // Автоматика и Телемеханика. 2002. № 12. С. 96 – 115.
3. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять организациями. М.: Синтег, 2003.
4. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976.
5. Гламаздин Е.С., Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы управления корпоративными программами: информационные системы и математические модели. М.: Спутник, 2001.
6. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64 – 116.
7. Губко М.В. Теоретико-игровая модель формирования торговой сети / Управление большими системами. М.: ИПУ РАН, 2003. Выпуск 6. С. 56 – 83.
8. Губко М.В., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Классификация моделей анализа и синтеза организационных структур / Сборник трудов "Управление большими системами". Выпуск 6. М.: ИПУ РАН, 2004. С. 5 – 21.
9. Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2002.
10. Новиков Д.А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. М.: Фонд "Проблемы управления", 1999.
11. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. М.: ИПУ РАН, 2003.
12. Новиков Д.А. Стимулирование в организационных системах. М.: Синтег, 2003.
13. Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы функционирования организационных систем с распределенным контролем. М.: ИПУ РАН, 2001.
14. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексивные игры. М.: Синтег, 2003.