СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНЫМИ ПРОЕКТАМИ

А.Л. Суханов[1]

В настоящей работе формулируется и решается задача согласованного управления научными проектами в рамках четырехуровневой иерархической организационной структуры. Основным результатом является формулировка условий согласованности интересов руководства организации, функциональных руководителей, руководителей научных проектов и исполнителей.

1. Введение

Теоретико-игровые модели анализа и синтеза механизмов управления являются предметом исследований в теории управления организационными системами [2]. Специфика управления проектами заключается, в том числе, в том, что они реализуются в рамках матричных структур, в которых исполнитель оказывается подчинен одновременно нескольким "равноправным" управляющим органам – например, руководителю проекта и своему функциональному руководителю (в отличие от линейных структур, в которых существует древовидная иерархия подчинения [11]). Такие структуры получили название систем с распределенным контролем. Систематически впервые их модели исследованы в [15]. Полная характеризация решений задачи управления в системе с несколькими управляющими органами (центрами) и одним управляемым субъектом – агентом – получена в [7, 9]. В дальнейшем модели с распределенным контролем развивались в нескольких направлениях: в [5] получено решение задачи управления для двухуровневой системы с несколькими центрами и несколькими агентами, характеризуемыми векторными предпочтениями; в [2, 5, 7] изучалась роль высшего руководства в согласовании интересов центров; в [6] рассматривались модели так называемых X-структур, в которых руководство исполнителями осуществляла управляющая компания; в [1] приведены модели матричных структур, в которых руководитель проекта обладает приоритетом при-

[1] *Статья написана совместно с Д.А. Новиковым.*

нятия решений перед функциональным руководителем. В упомянутых работах рассматривались теоретико-игровые модели, то есть модели, учитывающие активность поведения участников организационной системы. Кроме них существуют оптимизационные модели [3, 10], в рамках которых решается задача поиска иерархии управления, реализующей требуемые функции управления с минимальными затратами. В оптимизационных моделях целенаправленности поведения участников системы уделяется меньшее внимание, и их исследование выходит за рамки настоящей работы.

Научные проекты, в частности, характеризуются тем, что в них нарушается "равноправность" руководителей проектов и функциональных руководителей – исполнители подчинены, в первую очередь, функциональным руководителям, и руководители научных проектов вынуждены согласовывать с последними условия привлечения исполнителей для участия в тех или иных проектах. Более того, иногда руководители проектов оказываются непосредственно подчинены тем или иным функциональным руководителям.

Поэтому возникает задача построения модели системы управления научными проектами, и исследования в рамках этой модели условий согласования интересов всех участников системы. Эта задача и решается ниже в настоящей работе.

2. Описание модели

Рассмотрим типичную для управления научными проектами структуру системы управления, включающую четыре уровня: высшее руководство (ВР), функциональных руководителей (ФР) – например, заведующих отделами, лабораториями или кафедрами, руководителей научных проектов (РП) и исполнителей – см. рисунок 1.

Высшее руководство осуществляет планирование, обеспечение, координацию и контроль деятельности функциональных руководителей и руководителей проектов (всех или некоторых); функциональные руководители – руководителей проектов и исполнителей; руководители проектов – исполнителей. Так, на рисунке 1 представлена ситуация, когда все ФР подчинены ВР (в рамках линейной оргструктуры), часть РП (1-ый, j-ый и k-ый) также подчинены ВР (остальные РП – 2-ой и k–1-ый контролируются ВР через ФР). Некоторые РП подчинены ВР напрямую и ни контролируются ни одним из ФР (например первый РП). Исполнители подчинены и ФР и РП. Например, 1-ый исполнитель подчинен первому РП и второму ФР. Некоторые исполнители подчинены только руководителям проектов (например, второй и n-ый). Такие исполнители могут соответствовать внешним соисполнителям или сотрудникам временных трудовых коллективов, подчиненных РП.

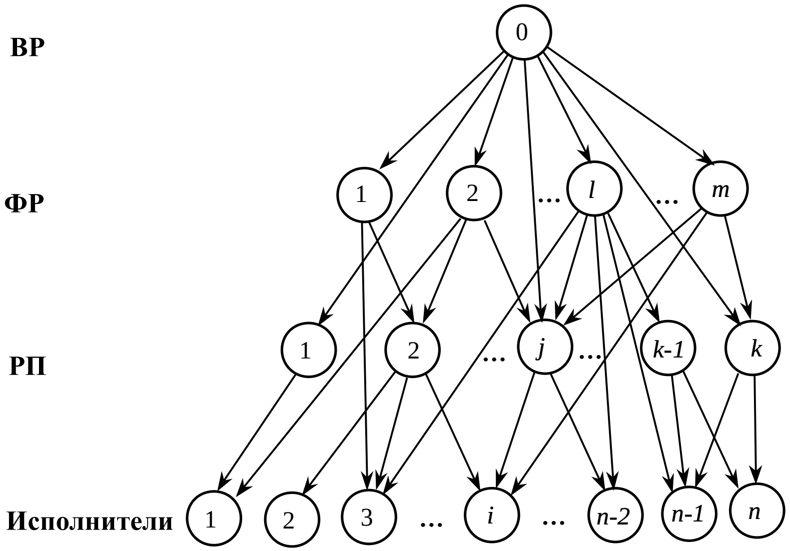

Рис. 1. Организационная структура системы управления научными проектами

Введем следующие обозначения:

$N = \{1, 2, \ldots, n\}$ – множество агентов (исполнителей);

$K = \{1, 2, \ldots, k\}$ – множество руководителей проектов;

$M = \{1, 2, \ldots, m\}$ – множество функциональных руководителей;

y_i Î A_i Í $\Re^{n_i}$, 0 Î A_i – действие i-го исполнителя, i Î N;

$y = (y_1, y_2, \ldots, y_n)$ Î A' Í $\Re^{\sum_{i \in N} n_i}$ – вектор действий исполнителей;

$c_i(y)$ – функция затрат i-го исполнителя, i Î N;

$h_j(y)$ – функция дохода j-го руководителя проекта, j Î K;

$H_l(y)$ – функция дохода l-го функционального руководителя, l Î M;

$H_0(y)$ – функция дохода высшего руководства;

$s_{ij}(y)$ – функция стимулирования i-го агента со стороны j-го руководителя проекта, i Î N, j Î K;

$v_{il}(y)$ – функция стимулирования i-го агента со стороны l-го функционального руководителя, i Î N, l Î M;

$u_{jl}(y)$ – функция стимулирования j-го руководителя проекта со стороны l-го функционального руководителя, j Î K, l Î M;

$s_j(y)$ – функция стимулирования j-го руководителя проекта со стороны высшего руководства, j Î K;

$q_l(y)$ – функция стимулирования l-го функционального руководителя со стороны высшего руководства, l Î M.

Структуру выплат между участниками системы поясняет рисунок 2.

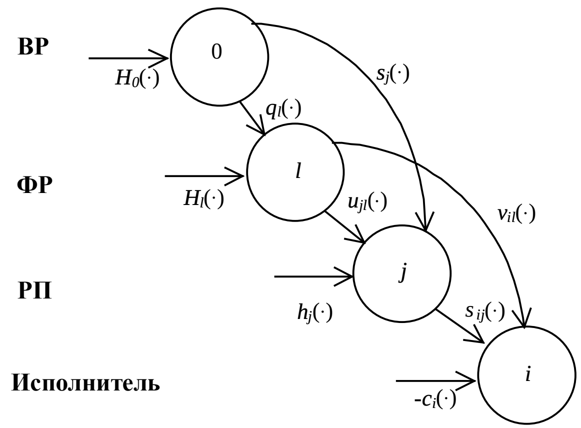

Рис. 2. Структура выплат между участниками организационной системы

Относительно функции затрат i-го агента предположим, что функция $c_i(y)$ возрастает по действию i-го агента и равна нулю при выборе i-ым агентом нулевого действия. Все вознаграждения будем считать неотрицательными в ходе всего последующего изложения.

Запишем целевые функции участников организационной системы. Целевая функция агента представляет собой сумму вознаграждений, полученных от всех руководителей проектов, в которых он участвует, плюс сумма вознаграждений, полученных от всех функциональных руководителей, которым он подчинен, минус собственные затраты агента[1]:

(1) $f_i(s_i, v_i, y) = \sum_{j\in K} s_{ij}(y) + \sum_{l\in M} v_{il}(y) - c_i(y),\ i \in N.$

Целевая функция руководителя проекта складывается из его дохода плюс сумма вознаграждений со стороны функциональных руководителей и высшего руководства за вычетом выплат исполнителям:

(2) $F_j(s_j, u_j, s_j, y) = h_j(y) + \sum_{l\in M} u_{jl}(y) + s_j(y) - \sum_{i\in N} s_{ij}(y),\ j \in K.$

Целевая функция функционального руководителя складывается из его дохода полюс вознаграждение со стороны высшего руководства за вычетом вознаграждений, выплачиваемых руководителям проектов и исполнителей:

(3) $F_l(q_l, u_l, v_l, y) = H_l(y) + q_l(y) - \sum_{j\in K} u_{jl}(y) - \sum_{i\in N} v_{il}(y),\ l \in M.$

Целевая функция высшего руководства складывается из его дохода за вычетом выплат функциональным руководителям и руководителям проектов:

(4) $F_0(y, s, q) = H_0(y) - \sum_{l\in M} q_l(y) - \sum_{j\in K} s_j(y).$

Последовательность функционирования следующая. Сначала высшее руководство выбирает свою стратегию и сообщает ФР и

[1] *Условимся обозначать вектор стимулирований той же буквой, что и его компоненты, опуская соответствующий индекс.*

РП вектор-функции стимулирования[1] $s(y)$ и $q(y)$, затем ФР выбирают свои вектор-функции стимулирования $u(y)$ и $v(y)$, после чего свои вектор-функции $s(y)$ выбирают РП, и, наконец, исполнители выбирают свои действия.

В соответствии с общим подходом [13], обобщающим двухуровневые иерархические игры [4, 8] на случай иерархий произвольной глубины, равновесие игры участников системы определяется следующим образом. Сначала ищется равновесие Нэша игры агентов, зависящее от стратегий всех игроков всех более высоких уровней иерархии (то есть, РП, ФР и ВР). При известной этой зависимости ищется равновесие игры на следующем уровне иерархии (игры РП) в зависимости от стратегий всех игроков всех более высоких уровней иерархии (то есть, ФР и ВР). И так далее, до самого верхнего уровня иерархии, на котором решается задача максимизации выигрыша ВР.

Понятно, что сформулированная задача чрезвычайно громоздка, так как в ней требуется искать зависимость равновесия (в игре, в которой стратегией игрока является выбор вектор-функции) от вектор-функций, выбранных участниками, находящимися на более высоких уровнях иерархии. Так, требуется, как минимум, найти: $\Re^{\sum_{i\in N} n_i}$-мерный вектор действий агентов, $k \times n$ равновесных функций стимулирования, выбираемых РП, $m \times n + m \times k$ равновесных функций стимулирования, выбираемых ФР, и $m + k$ оптимальных функций стимулирования, выбираемых ВР. Решить данную задачу "в лоб" для сколь-либо общего случая представляется невозможным. Поэтому воспользуемся известными результатами исследования подзадач исходной задачи.

3. Квазикомпенсаторное стимулирование и децентрализация игры агентов

Одним из основных результатов исследования задачи стимулирования является принцип компенсации затрат [12]: при решении задачи синтеза оптимальной функции стимулирования доста-

[1] *Как и в любой иерархической игре, предполагается, что на момент принятия решений игрок знает стратегии, выбранные игроками, находящимися на всех более высоких уровнях иерархии.*

точно ограничиться классом квазикомпенсаторных систем стимулирования, при использовании которых вознаграждение агента отлично от нуля и равно затратам агента только в случае выполнения последним плана, то есть выбора того действия, которое ему рекомендует центр.

Поэтому фиксируем вектор действий исполнителей $x \in A'$ и рассмотрим класс квазикомпенсаторных систем стимулирования:

(5) $\sigma_{ij}(x, y) = \begin{cases} \sigma_{ij}, & y_i = x_i \\ 0, & y_i \neq x_i \end{cases}, i \in N, j \in K,$

(6) $u_{jl}(x, y) = \begin{cases} u_{jl}, & y = x \\ 0, & y \neq x \end{cases}, j \in K, l \in M,$

(7) $v_{il}(x, y) = \begin{cases} v_{il}, & y_i = x_i \\ 0, & y_i \neq x_i \end{cases}, i \in N, l \in M,$

(8) $s_j(x, y) = \begin{cases} s_j, & y = x \\ 0, & y \neq x \end{cases}, j \in K,$

(9) $q_l(x, y) = \begin{cases} q_l, & y = x \\ 0, & y \neq x \end{cases}, l \in M.$

В соответствии с (5)-(9) ненулевые выплаты имеют место только в том случае, когда все участники стимулируют друг друга за выполнение одних и тех же планов, причем агенты выполняют планы. Отметим, что из (5) и (7) следует, что i-ый агент получает ненулевое вознаграждение (компенсацию затрат при любой обстановке игры) только в случае выполнения им соответствующей компоненты плана, независимо от того, выполнили ли планы остальные агенты. Соответствующий принцип управления был предложен в [14] и получил название принципа децентрализации игры агентов. Для сравнения отметим, что из (6), (8) и (9) следует, что вознаграждения ФР и РП отличны от нуля только в том случае, если все агенты выполнили планы.

Исследуем теперь вопрос о том, в каких случаях агентам будет выгодно выполнять планы и какие при этом должны быть равновесные системы стимулирования (5)-(9). Соответствующее управление назовем согласованным.

4. Согласованное управление

Задача поиска множества согласованных управлений заключается в формулировке условий того, что выбор соответствующих стратегий будет равновесием игры участников организационной системы на каждом из уровней иерархии. Другими словами, для каких планов найдется совокупность вознаграждений за выполнение этих планов (см. (5)-(9)), таких, чтобы агенты выполняли планы как равновесие Нэша своей игры, а выбор именно данных функций стимулирования был бы равновесием Нэша игры РП на своем уровне иерархии и ФР – на своем уровне. Имея решение этой задачи, в следующем разделе мы сформулируем и решим задачу синтеза оптимальных (с точки зрения ВР) согласованных управлений.

Исследуем сначала игру агентов.

<u>Лемма 1.</u> Если при использовании системы стимулирования агентов (5), (7) выполнено

(10) $\sum_{j \in K} \sigma_{ij} + \sum_{l \in M} v_{il} \geq c_i(x), i \in N,$

то выбор действия $y_i = x_i$ является доминантной стратегией i-го агента, $i \in N$.

Справедливость утверждения леммы 1 следует из подстановки (5), (7) и (10) в определение доминантной стратегии [8].

Вычислим следующие величины:

$$w_j = \max_{y \in A'} [h_j(y) - \sum_{i \in N} c_i(y)], j \in N,$$

$$W_l = \max_{y \in A'} [H_l(y) - \sum_{i \in N} c_i(y)], l \in M.$$

$$W_0 = \max_{y \in A'} [H_0(y) - \sum_{i \in N} c_i(y)].$$

<u>Утверждение 1.</u> При плане $x \in A'$ множества Парето-эффективных равновесий Нэша игры руководителей проектов и Парето-эффективных равновесий Нэша игры функциональных руководителей не пусты тогда и только тогда, когда выполнено (10) и

(11) $h_j(x) + \sum_{l \in M} u_{jl} + s_j - \sum_{i \in N} \sigma_{ij} \geq w_j, j \in K.$

(12) $H_l(x) + q_l - \sum_{j \in K} u_{jl} - \sum_{i \in N} v_{il} \geq W_l,\ l \in M.$

(13) $H_0(x) - \sum_{l \in M} q_l - \sum_{j \in K} s_j \geq W_0.$

Утверждение 1 доказывается по аналогии с соответствующими утверждениями в [9, 15].

Назовем план $x \in A'$ согласованным, если существует такой набор систем стимулирования, которые являются Парето-эффективными равновесиями игр ФР и РП, и при которых агенты выполняют план как равновесие своей игры. Также предположим, что в случае, когда множества равновесий игр ФР или РП состоят более чем из одной точки, ВР может выбирать любое конкретное равновесие из соответствующих множеств.

Лемма 1 и утверждение 1 обосновывают справедливость следующего утверждения.

Утверждение 2. Для того чтобы план $x \in A'$ был согласованным достаточно выполнения условий (10)-(13).

Утверждение 2 гласит, что заданный план будет согласованным, если для него найдется набор из $[(n + 1)(k + m) + k\,m]$ вознаграждений:

(14) $\{s_{ij}\}_{i \in N, j \in K}$, $\{v_{il}\}_{i \in N, l \in M}$, $\{u_{jl}\}_{j \in K, l \in M}$, $\{q_l\}_{l \in M}$, $\{s_j\}_{j \in K}$,

такой, что константы (14) удовлетворяют системе неравенств (10)-(13).

5. Оптимальное согласованное управление

Рассмотрим следующую задачу. Фиксируем план $x \in A'$ и найдем

(15) $C(x) = \min_{\{(s,q) | (10)-(13)\}} [\sum_{j \in K} s_j + \sum_{l \in M} q_l].$

Величина (15) характеризует минимальные затраты высшего руководства по реализации согласованного плана $x \in A'$. Для тех планов, для которых система неравенств (10)-(15) не имеет решения, положим затраты (15) равными плюс бесконечности.

С учетом (15) целевая функция (4) ВР примет вид:

(16) $\Phi_0(x) = H_0(x) - C(x).$

Оптимальным согласованным планом будет

(17) $x^* = \arg \max_{x \in A'} [H_0(x) - C(x)].$

По аналогии с результатами, приведенными в [5, 12], можно показать, что условием существования согласованного плана является следующее неравенство:

$$\max_{x \in A'} [H_0(x) + \sum_{l \in M} H_l(x) + \sum_{j \in K} h_j(x) - \sum_{i \in N} c_i(x)] \geq$$

$$\geq W_0 + \sum_{l \in M} W_l + \sum_{j \in K} w_j .$$

Таким образом, решение задачи согласованного управления научными проектами в рамках рассматриваемой модели состоит из двух этапов: на первом этапе для каждого плана $x \in A'$ проверить возможность его согласования (существования величин (13), удовлетворяющих (10)-(12)) и найти затраты (14) ВР; на втором этапе найти оптимальный согласованный план (16).

Задача, решаемая на первом этапе, хотя и является задачей линейного программирования, выглядит достаточно громоздко, тем более что решать такие задачи нужно для каждого плана $x \in A'$. Поэтому особенно привлекательно выглядит демонстрируемая ниже возможность нахождения аналитических решений.

Из (10)-(13) получаем, что для значения (15) справедлива следующая оценка: $\forall\ x \in A'$

(18) $C(x) \geq \sum_{l \in M} W_l + \sum_{j \in K} w_j - \sum_{l \in M} H_l(x) - \sum_{j \in K} h_j(x) + \sum_{i \in N} c_i(x).$

Таким образом, обоснована справедливость следующего утверждения:

Утверждение 3. Для максимального выигрыша ВР справедлива следующая оценка:

(19) $\Phi_0^* \leq H_0(x^{**}) - C(x^{**})$

где

(20) $x^{**} = \arg \max_{x \in A'} [H_0(x) + \sum_{l \in M} H_l(x) + \sum_{j \in K} h_j(x) - \sum_{i \in N} c_i(x)].$

Интересно отметить, что согласованный план (20) максимизирует сумму целевых функций всех участников системы – ВР, ФР, РП и исполнителей, то есть является Парето-оптимальным с точки зрения системы в целом.

6. Заключение

Таким образом, в настоящей работе найдены простые содержательно интерпретируемые условия согласования интересов в четырехуровневой системе распределенного управления научными проектами. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется обобщение полученных результатов на случай систем с неполной информированностью управляющих органов.

Литература[1]

1 *Балашов В.Г., Заложнев А.Ю., Иващенко А.А., Новиков Д.А. Механизмы управления организационными проектами. М.: ИПУ РАН, 2003. – 84 с.

2 Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять организациями. М.: Синтег, 2004. – 400 с.

3 *Воронин А.А., Мишин С.П. Оптимальные иерархические структуры. М.: ИПУ РАН, 2003. – 210 с.

4 Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. – 327 с.

5 *Гилев С.Е., Леонтьев С.В., Новиков Д.А. Распределенные системы принятия решений в управлении региональным развитием. М.: ИПУ РАН, 2002. – 54 с.

6 *Гламаздин Е.С., Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы управления корпоративными программами: информационные системы и математические модели. М.: Спутник, 2003. – 159 с.

7 *Губко М.В. Механизмы управления организационными системами с коалиционным взаимодействием участников. М.: ИПУ РАН, 2003. – 118 с.

8 *Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2002. – 148 с.

9 *Караваев А.П. Модели и методы управления составом активных систем. М.: ИПУ РАН, 2003. – 151 с.

10 *Мишин С.П. Оптимальные организационные иерархии в социально-экономических системах. М.: ПМСОФТ, 2004. – 207 с.

[1] *Работы, отмеченные звездочкой, можно найти на сайте теории управления организационными системами www.mtas.ru.*

11 *Новиков Д.А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. М.: Фонд «Проблемы управления», 1999. – 150 с.

12 Новиков Д.А. Стимулирование в организационных системах. М.: Синтег, 2003. – 312 с.

13 *Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. М.: ИПУ РАН, 2003. – 102 с.

14 *Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы стимулирования в многоэлементных организационных системах. М.: Апостроф, 2000 – 184 с.

15 *Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы функционирования организационных систем с распределенным контролем. М.: ИПУ РАН, 2001. – 118 с.