

ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ В АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ

А.Г. Чхартишвили

Предметом рассмотрения в настоящей работе является информационное управление – воздействие на информированность принимающих решение субъектов, осуществляемое с целью побуждения их к совершению требуемых действий.

1. Введение. Модель информационного управления. Задача управления *активной системой* (элементы которой способны к целенаправленному поведению) с теоретико-игровой точки зрения состоит в том, чтобы создать для управляемых субъектов (*агентов*) игру с такими правилами, чтобы ее исход был как можно более благоприятным для управляющего органа (*центра*).

Предметом рассмотрения в настоящей работе является информационное управление, то есть воздействие на информированность принимающих решение субъектов – элементов активной системы, осуществляемое с целью побуждения их к совершению требуемых действий. Например, бизнесмен принимает решения о производстве того или иного товара в том или ином объеме на основе своей информированности о рынке (потребителях) и о конкурентах. Избиратель принимает решение проголосовать за того или иного кандидата на выборах на основании информированности об этом кандидате, о прочих кандидатах, о мнениях и предпочтениях других избирателей. Соответственно, любое целенаправленное воздействие на информированность бизнесмена в первом случае и избирателя во втором является информационным управлением. Как будет показано далее, рассмотрение информационных аспектов дает возможность в ряде случаев расширить множество рациональных исходов игры, что, в свою очередь, увеличивает эффективность управления.

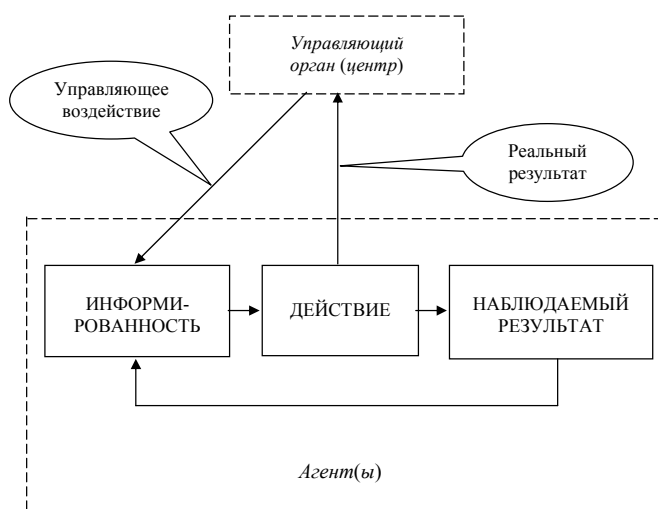


Рис. 1. Модель информационного управления

На рисунке 1 показана модель информационного управления, предложенная в работе [4]. Управляемый субъект (агент) выбирает действие на основе своей информированности о существенных параметрах. Совершив действие, агент наблюдает результат этого действия, причем наблюдаемый результат зависит, вообще говоря, от действий остальных агентов. Продолжая пример с бизнесменом можно сказать так: он принимает то или иной решение, но результат (например, полученный им доход) зависит также и от действий конкурентов (и, косвенно, от их информированности). Наблюдаемый результат, естественно, оказывает влияние на информированность. На рисунке цикл «информированность – действие – наблюдаемый результат – информированность» обведен пунктирным прямоугольником, обозначающим управляемую подсистему. С другой стороны, информированность агента приводит, через его действие, к результату, более или менее желательному с точки зрения управляющего органа (центра). Поэтому центр стремится, путем осуществления управляющего воздействия, добиться той или иной информированности агента.

2. Общая технология постановки и исследования задач информационного управления. Опираясь на приведенную выше модель, опишем общую технологию постановки и исследования задач информационного управления. Она состоит из трех этапов.

Предварительный этап включает, во-первых, формализацию ситуации в терминах теории игр – описание множества агентов, их допустимых действий и целевых функций. Во-вторых, формализацию неопределенности, присутствующей в ситуации. В третьих, определение множества информационных структур, которые могут быть сформированы центром исходя из особенностей ситуации. На предварительном этапе происходит, таким образом, наполнение модели информационного управления исходными данными.

На *этапе теоретико-игрового анализа* вычисляются информационные равновесия, то есть выявляется связь между информированностью и действием (п. 3). Далее, проверяется стабильность равновесий, то есть неизменность информированности после наблюдения агентом результата своего выбора (п. 5).

На *этапе синтеза* решается собственно задача информационного управления – определяется наилучшая для центра информационная структура, то есть такая структура, при которой результат действий агентов является наиболее желательным для центра (п. 6). Наконец, заключительный шаг – разработка информационного воздействия на агентов. В (п. 7) приведены и классифицированы виды информационных управляющих воздействий центра.

3. Рефлексивные игры. Перейдем к систематическому изложению результатов исследований информационного управления. Начнем с описания информированности агентов и связи информированности с их действиями. Собственно говоря, именно эта задача является ключевой для любой теоретико-игровой модели – описание зависимости между, так сказать, «правилами игры» и ее результатом при условии рационального поведения участников.

Как известно, игра с полной информированностью в нормальной форме задается перечислением множества игроков (агентов), множеством их допустимых действий и набором их целевых функций. Однако существенным является вопрос: известно ли само это описание участникам игры? Долгое время в теории игр «по умолчанию» предполагалось, что игра известна всем ее участникам и, более того, она является общим знанием среди участников. Этот технический термин – общее знание – был введен философом Дэвидом Льюисом (1969), а в теорию игр Робертом Ауманном (1976) для обозначения факта, о котором известно всем агентам, и всем агентам известно, что о нем известно всем агентам и т.д.

Ясно, что далеко не всегда игра является общим знанием. Для моделирования таких ситуаций введено понятие *рефлексивной игры* [2]

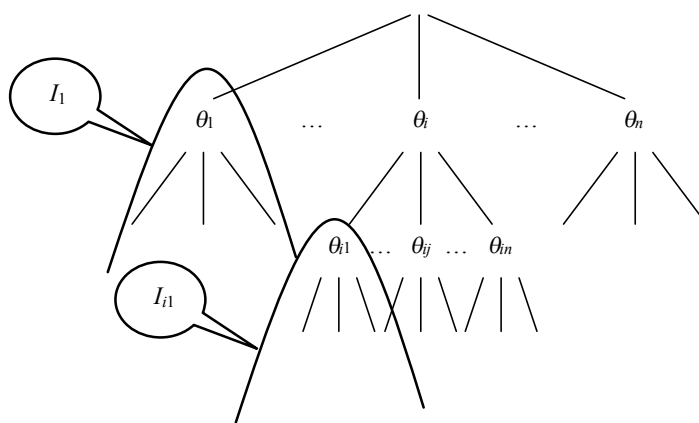


Рис. 2. Структура информированности

В отличие от игры с общим знанием целевые функции агентов в рефлексивной игре зависят от неопределенного параметра, называемого также состоянием природы. У каждого из агентов, вообще говоря, может быть свое представление о том, какое состояние природы имеет место. Далее, у каждого агента может быть свое представление о представлениях оппонентов, о представлениях о представлениях и т.д. Совокупность всех этих представлений образует структуру информированности игры – бесконечное n -арное дерево. Структура информированности каждого агента представляет собой некоторое поддерево структуры информированности игры. Это дерево можно интерпретировать следующим образом: наряду с n реальными агентами – участниками ситуации – для анализа необходимо учитывать образы этих аген-

тов в сознании оппонентов – фантомные агенты. На рисунке 2 выделены реальный первый агент (его структура информированности – I_1) и его образ в сознании i -го агента (обозначается I_{i1}). Эти два дерева, две структуры информированности, могут как совпадать, то есть быть тождественными, так и различаться. Если они тождественны, то i -й агент адекватно информирован о первом агенте, если нет – неадекватно.

Если общее число попарно-различных фантомных агентов конечно, то структура информированности игры имеет конечную *глубину* – уровень, при превышении которого каждое поддерево совпадает с одним из поддеревьев менее глубокого уровня.

В частности, если имеет место общее знание, то все фантомные агенты тождественны реальным и глубина равна единице. В общем случае глубина может принимать любое конечное значение, а также быть бесконечной. Общее число попарно-различных реальных и фантомных агентов называется *сложностью* структуры информированности.

В зависимости от глубины структуры информированности игры мы получаем, вообще говоря, различные теоретико-игровые модели. «Классическая» теория игр рассматривала ситуацию с полной информированностью, что соответствует единичной глубине. В конце 60-х годов Джон Харшаньи [5] рассмотрел модель с информированностью глубины 2. В 1985 году Мертенс и Замир [6] рассмотрели максимально общую модель информированности бесконечной глубины. Предложенная ими конструкция обладает большой общностью, однако слишком громоздка для моделирования каких-либо реальных ситуаций. При этом вопрос о моделях с промежуточной (между двумя и бесконечностью) глубине рефлексии оставался открытым, если не считать статьи Жозефа Саковича [7], где анализировалась модель глубины три с двумя агентами. Рефлексивные игры в некотором смысле заполняют «белое пятно» между двумя и бесконечностью, позволяя рассматривать ситуации с рефлексией произвольной конечной глубины.

4. Информационное равновесие. Описав структуру информированности игры, определим концепцию ее решения, то есть ответ на вопрос, какие действия выберут рациональные агенты в рамках своей информированности. Иными словами, какова связь между информированностью агента и избранным им действием. Решением рефлексивной игры является *информационное равновесие* [2] – набор действий реальных и фантомных агентов, при котором каждый агент максимизирует свою целевую функцию в рамках своей информированности о состоянии природы и такого же выбора ожидает от оппонентов. При этом тождественные агенты выбирают одинаковые действия. Информационное равновесие является обобщением равновесия Нэша – наиболее общераспространенной концепции решения некооперативной игры. Сложность (и, соответственно, глубина) структуры информированности предполагается конечной. Это обусловлено как содержательными, так и формальными соображениями. С содержательной точки зрения ограниченность глубины рефлексии агентов представляется достаточно естественной. Чем плоха бесконечная глубина с формальной точки зрения? Оказывается, что справедлив следующий результат [3]: при некоторых дополнительных условиях неограниченность глубины структуры информированности означает, что любое допустимое действие агента оказывается равновесным. Это обстоятельство, по-видимому, свидетельствует о нецелесообразности рассмотрения структур бесконечной глубины

5. Наблюдаемый результат и информированность. Стабильные информационные равновесия. В «обычной» игре с полной информированностью равновесие имеет самоподдерживающий характер – если игра повторяется несколько раз, ни одному из агентов не выгодно отклоняться от равновесия в одностороннем порядке. Для рефлексивных игр это, вообще говоря, не так – если какой-либо агент наблюдает не тот результат, который ожидал увидеть, принимая решение, его представление о реальности может измениться. Поэтому представляется необходимым выделить те информационные равновесия, для которых свойство стабильности равновесия выполняется. Для этого дополним определение рефлексивной игры функциями наблюдения, отражающими ту информацию, которую каждый агент наблюдает в результате разыгрывания игры. Информационное равновесие будем называть стабильным, если каждый агент (как реальный, так и фантомный), наблюдает именно тот результат, на который рассчитывал.

6. Информационное управление. Рефлексивные отображения. Следующий элемент модели информационного управления – зависимость между информированностью агентов и тем результатом, той полезностью, которую центр получает в результате игры.

Важным вспомогательным инструментом для исследования вопроса о том, чего может достичь центр в результате информационного управления, являются рефлексивные отображения. Областью зна-

чений рефлексивного отображения каждого агента является множество его всевозможных наилучших ответов при заданном состоянии природы и заданной обстановке. Если начать с равновесия при единичной глубине структуры информированности (это параметрическое равновесие Нэша), можно при помощи рефлексивных отображений получать множество всевозможных равновесий при данной глубине структуры. Справедлив следующий факт: с увеличением глубины множество равновесий не сужается. Это означает, в свою очередь, что не сужаются возможности центра по управлению.

Особым случаем являются стационарные рефлексивные отображения, когда множество равновесий не расширяется с увеличением глубины структуры информированности. Оказывается, что если рефлексивные отображения стационарны, то при осуществлении информационного управления увеличение ранга рефлексии свыше первого не приводит к появлению новых информационных равновесий.

7. Информационные воздействия. Следующий элемент представленной в (п. 1-2) модели информационного управления – информационное управляющее воздействие. Вопрос состоит в следующем: как формируется информационная структура игры в зависимости от тех или иных информационных воздействий центра. Здесь необходимо признать, что сколько-нибудь исчерпывающий ответ на этот вопрос, по видимому, невозможно получить, оперируя исключительно математическими (и, в частности, теоретико-игровыми) моделями. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что процесс усвоения человеком той или иной информации в очень большой степени обусловлен факторами социально-психологического порядка. Тем не менее, можно выделить и формализовать некоторые виды информационных воздействий.

Первым, наиболее простым видом управляющего воздействия является однородное информационное регулирование – центр сообщает агентам значение неопределенного параметра. Данное значение становится общим знанием среди агентов.

Следующий вид воздействия – неоднородное информационное регулирование. Каждому агенту сообщается значение неопределенного параметра, однако, каждому – свое. Для каждого агента данное значение субъективно становится общим знанием.

Следующий вид воздействия – рефлексивное управление. Каждому агенту сообщается значение неопределенного параметра и представления других агентов. В результате формируется более сложная структура информированности, вообще говоря – глубины 3.

Более тонким видом информационного воздействия является активный прогноз. Агентам сообщается некая величина, зависящая от состояния природы и действий агентов (например, суммарное действие агентов). Центр как бы сообщает агентам: «Если вы будете действовать рационально, то есть выберете равновесные действия, то результат будет таким, как я прогнозирую». Далее каждый агент на основании прогноза может «восстановить» информацию о состоянии природы и использовать эту информацию (как и при информационном регулировании) при вычислении равновесных действий (в том числе и собственного действия). Классический пример активного прогноза: эксперт по фондовому рынку дает прогноз: «цены на акции резко упадут». Услышав это, все держатели акций начинают спешно их продавать, и цены действительно резко падают.

8. Рефлексивная неманипулируемость. Одной из классических задач теории управления организационными системами является задача исследования манипулируемости механизма планирования. Агенты сообщают центру свои типы, центр на основе этих сообщений назначает каждому агенту план. Неманипулируемый механизм планирования характеризуется следующим: сообщение своих истинных типов является равновесным действием каждого агента. Если типы агентов не являются общим знанием, и центр может влиять на информированность агентов о типах оппонентов, то возможно построение *рефлексивно неманипулируемого* механизма планирования: сообщение агентами своих истинных типов является информационным равновесием.

9. Граф рефлексивной игры. Удобным инструментом исследования информационного равновесия является граф рефлексивной игры, в котором вершины соответствуют реальным и фантомным агентам, и в каждую вершину входит ровно $(n - 1)$ дуга (здесь n – число реальных агентов), идущая из вершин-агентов, от действий которых субъективно зависит выигрыш данного агента.

Граф рефлексивной игры может быть построен и без конкретизации целевых функций агентов. При этом он отражает если не количественное соотношение интересов, то качественное соотношение информированности рефлексизирующих агентов. Приведем иллюстративные примеры.

Пример 1. Пусть в ситуации участвуют два государства (А и В) и агент, который, будучи высокопоставленным чиновником государства А является одновременно осведомителем государства В, о чем государству А неизвестно. Граф информационного равновесия описанной ситуации изображен на рис. 3.

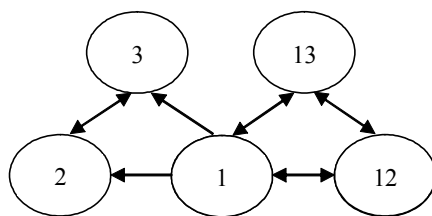


Рис. 3. Граф рефлексивной игры в примере 1

Вершинам графа соответствуют следующие реальные и фантомные агенты:

1 – государство А;

2 – государство В;

3 – агент;

12 – государство В, которое воспринимает агента как чиновника, верного государству А;

13 – агент – чиновник, верный государству А.

Пример 2. Ситуация похожа на описанную в примере 1, различие в том, что агент на самом деле работает на государство А, а государству В передает лишь соответствующим образом обработанные сведения. Граф рефлексивной игры этой, более сложной, ситуации изображен на рис. 4.

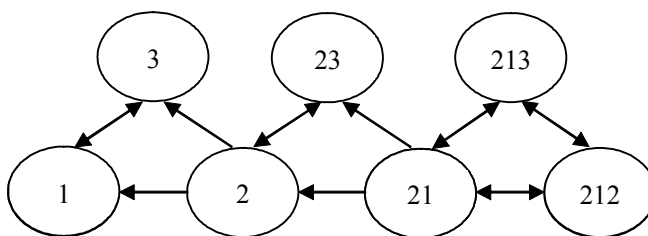


Рис. 4. Граф рефлексивной игры в примере 2

Вершинам графа соответствуют следующие реальные и фантомные агенты:

1 – государство А;

2 – государство В;

3 – агент;

21 – государство А, которое ошибочно полагает, что агент – его чиновник, не входивший ни в какие контакты с государством В;

23 – агент, работающий в пользу государства В;

212 – государство В, которое не входило ни в какие контакты с агентом – чиновником государства А;

213 – агент – чиновник, верный государству А и не входивший ни в какие контакты с государством В.

В работе [4] при помощи концепции рефлексивных игр исследован ряд прикладных задач информационного управления в области экономики, маркетинга, политики и т.д.

10. Заключение. Введение структуры информированности, информационного равновесия и графа рефлексивной игры позволяет при помощи единого математического аппарата описывать и анализировать разнообразные ситуации коллективного принятия решений агентами, обладающими различной информированностью, в том числе информированностью друг о друге. Рассмотрение взаимной информированности агентов дает возможность, во-первых (с нормативной точки зрения), расширить множество рациональных исходов их игры, что, в свою очередь, увеличивает эффективность управления (а также иногда позволяет достичь достоверности сообщаемой агентами информации). Во вторых (с дескриптивной точки зрения), многие наблюдаемые на практике ситуации, которые не могут быть интерпретированы как «обычные» равновесия Нэша в условиях общего знания, являются информационным равновесием.

В контексте настоящей статьи человеческий фактор в управлении проявляется в том, что

1. человек принимает решение на основании имеющейся у него информированности, поэтому одним из типов управления людьми является влияние на их информированность (информационное управление);
2. информированность человека в конфликтной ситуации есть информированность как об объективных параметрах, так и о представлениях других людей об этих параметрах (информационная рефлексия).

В заключение отметим, что перспективным представляется дальнейшее развитие формальных моделей информационного управления, в том числе исследование динамики формирования информационной структуры под воздействием последовательности целенаправленных сообщений.

Литература

1. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Активный прогноз. М.: ИПУ РАН, 2002.
2. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексивные игры. М.: СИНТЕГ, 2003.
3. Чхартишвили А.Г. Равновесие Байеса–Нэша: точечные структуры информированности бесконечной глубины // *АиТ*. 2003. № 12. С. 105 – 111.
4. Чхартишвили А.Г. Теоретико-игровые модели информационного управления. М.: ПМСОФТ, 2004.
5. Harsanyi J. Games with incomplete information played by «Bayesian» players // *Management Science*. Part I: 1967. Vol. 14. № 3. P. 159 – 182. Part II: 1968. Vol. 14. № 5. P. 320 – 334. Part III: 1968. Vol. 14. № 7. P. 486 – 502.
6. Mertens J.-F., Zamir S. Formulation of Bayesian analysis for games with incomplete information // *Int. J. Game Theory*. 1985. № 14. P. 1 – 29.
7. Sakovics J. Games of incomplete information without common knowledge priors // *Theory and decision*. 2001. № 50. P. 347 – 366.