

Рефлексивные процедуры анализа экспертных данных

В.Б. Гусев, Н.А. Исаева

Аннотация. Разработаны процедуры расчета оценок для долгосрочных последствий взаимодействия факторов на основе экспертных данных. Оценки влияния одних факторов на другие и оценки изменения факторов интерпретируются как объекты многозначной логики. Предметом рассмотрения является метод экспертного анализа, использующий рефлексивные процедуры многозначного логического вывода для получения транзитивного замыкания оценок взаимного влияния рассматриваемых факторов.

Ключевые слова: оценки взаимодействия факторов, объекты многозначной логики, метод экспертного анализа, рефлексивные процедуры, транзитивное замыкание

Введение

Принятие решений в сфере управления сложными объектами требует учета большого числа одновременно действующих факторов. Поскольку исчерпывающий количественный анализ всего действующего набора рассматриваемых факторов для сложных объектов весьма затруднителен, имеет смысл исследовать их системное влияние на качественном уровне с применением моделей причинно-следственных влияний, имитирующих цепочки рассуждений [1, 2]. В результате сложения эффекта от всех цепочек воздействий, исходящих от каждого фактора-причины и заканчивающихся факторами-следствиями, формируется системный эффект, определяемый полной совокупностью прямых и возникающих косвенных связей. Исходная («примитивная») система влияний в результате такого рефлексивного суммирования всех косвенных воздействий порождает систему полных влияний как их транзитивное замыкание. Однако человек без помощи техниче-

ских средств, как правило, в состоянии отследить лишь ограниченную длину в цепочках заключений (ограниченное число влияний).

Цель работы заключается в разработке процедур расчета оценок для долгосрочных последствий взаимодействия рассматриваемого набора факторов. Оценки влияния одних факторов на другие, как и оценки изменения факторов, задаются в балльной системе с положительными и отрицательными значениями и интерпретируются в терминах многозначной логики. Используемые оценки взаимовлияния факторов в результате их взаимодействия являются более консервативными, чем оценки состояния самих факторов, которые с течением времени могут иметь большой разброс. Значения оценок транзитивного замыкания влияний факторов на самих себя позволяют судить о степени устойчивости этих оценок.

Начальный анализ взаимовлияния факторов заключается в исследовании парных взаимодействий [3, 4]. Из всех пар на множестве рассматриваемых факторов выделяются пары, для которых можно представить механизм непо-

средственного взаимодействия типа «причина – следствие». Это так называемые «примитивные» взаимодействия. Косвенные влияния на этом этапе отсеиваются. Топология связей определяется на основании представлений эксперта об исследуемых процессах. Структура примитивных связей и значения коэффициентов связи уточняются в процессе верификации модели.

Прикладной задачей анализа транзитивного замыкания взаимодействий из рассматриваемой совокупности факторов является получение выводов об эффективности механизмов управления с точки зрения их воздействия на контролируемые показатели. Результаты рефлексий оценок взаимодействий могут быть использованы в качестве подсказок при рациональном выборе управляющих факторов и принятии управленческих решений.

Процедура рефлексий с логическим выводом при оценивании результатов взаимного влияния факторов

Пусть рассматриваемым факторам могут быть приписаны численные значения показателей состояния X_i . Изменение этих показателей, обусловленное непосредственным действием возмущающих факторов, будем характеризовать как результат примитивных взаимодействий. Наблюдаемые результаты взаимодействий факторов (полные взаимодействия) определяются как примитивными, так и косвенными влияниями. Примитивные взаимодействия могут отличаться по степени (интенсивности) и характеру влияния. Последний определяется свойствами группового воздействия: независимым или совместным. При совместном воздействии его результат оценивается нелинейной сверткой, в частности, по наименьшей из оценок влияния компонент группы.

Схема примитивных взаимодействий факторов представляется экспертной матрицей \mathbf{A} . Коэффициент a_{ij} этой матрицы означает оценку сверху первичного прироста фактора i , вызываемого приращением фактора j (аналог пропускной способности канала, направленного от фактора j к фактору i). Оценка действия

представляется в балльной шкале. Значения коэффициентов a_{ij} матрицы \mathbf{A} , назначаемые экспертным способом, находятся в интервале $[a_{\min}, a_{\max}]$. Знаки коэффициентов определяются характером влияния – положительным или отрицательным.

Поскольку показатели примитивных взаимодействий факторов измеряются экспертным путем (например, путем определения рейтинга или балльной оценки), то им можно приписать свойства информационных объектов, и предположение о линейности операций над этими показателями не оправдано. Оценки влияния можно рассматривать как значения переменных в многозначной логике. В связи с этим целесообразно использовать правила операций дискретного типа, напоминающие логику операций с потоками информации. А именно, принимаются правила, которые можно отнести к правилам многозначной логики, аналогичные правилам булевой алгебры.

Будем считать, что компоненты X_i вектора оценок состояния \mathbf{X} оцениваются в той же шкале, что и коэффициенты a_{ij} матрицы \mathbf{A} . Операции над оценками (компонентами вектора оценок состояния \mathbf{X} и матрицы \mathbf{A}) следующие: логическая сумма \oplus (аналог конъюнкции, или логической суммы в булевой алгебре), логическое произведение \otimes (аналог дизъюнкции, или логического произведения в булевой алгебре).

Результат однократного воздействия факторов переводит приращение $\Delta\mathbf{x}$ их начального вектора состояния \mathbf{X} в состояние $\mathbf{Y} = \mathbf{X} \oplus \Delta\mathbf{x}$, определяемое как действие логической векторной операции

$$\Delta\mathbf{y} = \mathbf{A} \otimes \Delta\mathbf{x}, \quad (1)$$

где знаком \otimes обозначена векторная операция логического умножения матрицы на вектор. Эта операция включает следующие скалярные операции многозначной логики

$$\Delta y_{ij} = a_{ij} \otimes \Delta x_j,$$

$$\Delta y_i = \bigoplus_j a_{ij} \otimes \Delta x_j.$$

Принятые правила операций над оценками взаимодействия можно отнести к правилам многозначной логики, обладающей следующими свойствами:

- результат последовательного действия в цепочке 2-х операций (логическое умножение операндов) с противоположными по знаку оценками дает отрицательную оценку влияния;
- если связь не входит ни в один цикл графа влияний, то в результате рефлексии ее оценка должна сохранять свое значение;
- результат параллельного действия связей (логическая сумма операндов) с одной и той же оценкой должен иметь ту же оценку;
- при двузначной логике операции многозначной логики совпадают с операциями булевой алгебры.

Указанными свойствами обладают следующие правила операций многозначной логики. Результат независимого примитивного воздействия фактора j на фактор i представляется формулой логического умножения

$$y_{ij} = a_{ij} \otimes \Delta x_j = \min(|a_{ij}|, |\Delta x_j|) \text{sign}(a_{ij} \Delta x_j).$$

Результат совместного взаимно дополнительного (комплементарного) воздействия группы факторов g , когда для результата требуется воздействие всех факторов группы, представляется формулой

$$\Delta y_{ig} = \min_j \{ \Delta y_{ij} \} \text{sign} \left(\prod_j \Delta y_{ij} \right), j \in g.$$

Для обозначения совместного воздействия факторов кроме численного значения используется символ группы влияния.

Результат взаимно компенсирующего (субституционального) воздействия факторов j и k на фактор i , когда для результата достаточно любого из действующих факторов, представляется формулой логической суммы

$$\begin{aligned} \Delta y_{ij} \oplus \Delta y_{ik} &= \\ &= \max(|\Delta y_{ij}|, |\Delta y_{ik}|) \text{sign}(\Delta y_{ij} + \Delta y_{ik} \pm \varepsilon), \end{aligned}$$

где $0 < \varepsilon < 1$ - добавка, позволяющая оценить разброс результатов в результате вычислительной неоднозначности операции sign .

Будем считать, что номенклатура компонент векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} совпадают (матрица \mathbf{A} квадратная). Тогда итеративное применение операции (1) отражает изменение состояния в модельном времени. Для расчета транзитивного замыкания оценок взаимодействия можно использовать итеративную процедуру, использующую операцию (1) при замене $\Delta \mathbf{y}$ на $\Delta \mathbf{x}$, применительно к каждому вектору из набора

$$(\mathbf{a}_{\max}, 0, \dots, 0), (0, \mathbf{a}_{\max}, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \mathbf{a}_{\max}).$$

Нетрудно видеть, что итеративный процесс, использующий преобразование (1), может либо сходиться к вектору оценки состояния с учетом полного набора воздействий, либо порождать циклическую последовательность, характеризуемую границами изменения оценок факторов.

Если процесс итераций сходится, результирующие векторы образуют столбцы матрицы \mathbf{B} полных взаимодействий (транзитивного замыкания первичных оценок). Если процесс итераций не сходится, ввиду конечности значений компонент вектора оценок, результирующий вектор может циклически пробегать некоторый набор состояний. В этом случае можно определять граничные значения компонент вектора состояний.

Альтернативный, более быстрый алгоритм расчета матрицы \mathbf{B} полных взаимодействий состоит в следующем. Результат двух последовательных воздействий факторов i -го на j -й с оценкой a_{ijk} и j -го на k -й с оценкой a_{jk} в цепочке 2-х взаимодействий $a_{ij} \otimes a_{jk}$ (аналог дизъюнкции, или логического произведения в булевой алгебре) определяется по той из двух исходных оценок, которая минимальна по абсолютной величине. Если оба последовательных воздействия имеют оценки разных знаков, то их общий результат будет отрицательным. В противном случае результат положительный. Оценку последовательных операций можно представить в виде

$$a_{ij} \otimes a_{jk} = \min(|a_{ij}|, |a_{jk}|) \text{sign}(a_{ij} a_{jk}).$$

Если на данный фактор действуют несколько других факторов, то их совместный эффект $a_{ik} \oplus a_{jk}$ (аналог конъюнкции, или логической

суммы) может определяться различными способами в зависимости от того, являются эти факторы взаимодополняющими или взаимно компенсирующими. Параллельное применение операций, воздействующих на какой-либо фактор, может оцениваться по правилам свертки, например, по правилам, применяемым в методе комплексного оценивания [5]. В случае, когда факторы компенсируют друг друга, результат определяется по принципу *доминирования*: результат равен максимальной по абсолютной величине оценке факторов-аргументов

$$a_{ik} \oplus a_{jk} = \min(a_{\max}, \max(|a_{ik}|, |a_{jk}|)) \text{sign}(a_{ik} + a_{jk}).$$

В случае, когда факторы, действующие параллельно, являются дополнительными, результат определяется минимальной по абсолютной величине оценке факторов-аргументов

$$a_{ik} \oplus a_{jk} = \min(a_{\max}, \min(|a_{ik}|, |a_{jk}|)) \text{sign}(a_{ik} + a_{jk}).$$

Результат рефлексивной процедуры может быть получен путем последовательного суммирования преобразований \mathbf{A}^k , $k = 1, 2, \dots$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \oplus \mathbf{A}^2 \oplus \mathbf{A}^3 \oplus \dots \quad (2)$$

при условии сходимости этого ряда. Если в процедуре (2) возникает циклический процесс, алгоритм должен предусматривать остановку при достижении границ разброса соответствующих оценок.

Результаты процедур (1) и (2) совпадают, если оба соответствующих процесса сходятся. Действительно, каждое слагаемое суммы (2) представляет собой шаг рефлексии, задаваемый соотношением (1), таким образом, результирующие вектор-столбцы процесса (1) являются столбцами матрицы \mathbf{B} .

При выполнении алгоритмов с рассмотренными наборами операций над оценками взаимодействия исходный набор оценок может распространиться на взаимодействия всех пар факторов. Кроме того, может произойти замена части исходных показателей на значения, большие по абсолютной величине.

Верификация схемы примитивных взаимодействий

Варьируя исходные оценки, можно определить степень их участия в формировании полной картины влияний факторов. Кроме того, анализируя результат алгоритма, можно определить противоречивость исходных оценок. Исходная оценка является противоречивой (избыточной), если в результате рефлексий она замещается другой оценкой.

Неопределенность, присущая экспертному подходу, может иметь различное происхождение. Первое – это отсутствие точных данных, которое частично компенсируется знаниями эксперта, также неточно отображающими действительность. Этот вид неопределенности учитывается на этапе верификации в диалоге с экспертом. Второе – это инструментальная погрешность при обработке экспертных данных, возникающая как результат неадекватности гипотез, лежащих в основе операций над экспертными данными. Оценить инструментальную погрешность можно по разбросу результатов, полученных процедурами, использующими разные гипотезы.

Процедуры верификации играют существенную роль при назначении оценок влияния. Они сопровождаются анализом влияния оценок примитивных связей на системные оценки. Цель такого анализа – получить качественное соответствие комплекса оценок системного взаимодействия факторов с ожидаемыми экспертом оценками влияний. Полного совпадения может не оказаться, что может свидетельствовать как о дефекте схемы, так и о недостаточной адекватности ожиданий эксперта, проявляющейся в объективной невозможности добиться требуемой конфигурации оценок системного взаимодействия.

Верификация модели (выбор или уточнение значений коэффициентов матрицы, проводимое с участием эксперта) проводится исходя из требования, чтобы эффект воздействия факторов денежно-финансовой политики на контролируемые факторы в целом соответствовал зависимостям, основанным на статистических данных, а также ожиданиям эксперта. Например, чтобы управляющие воздействия давали положительный результат – приводили к повышению показателей контролируемых факторов

(соответствующие коэффициенты влияния имели нужные значение или знак).

Для верификации модели могут использоваться следующие процедуры.

– Анализ чувствительности оценки конкретной системной связи к задаваемым вариациям оценок примитивных связей.

– Поиск связей, зависящих от конкретной примитивной связи для заданного числа рефлексий.

– Поиск примитивных связей, влияющих на данную системную связь за заданное число рефлексий.

Верификацию можно рассматривать как решение обратной задачи, когда по оценкам наблюдаемых зависимостей восстанавливаются оценки примитивных зависимостей, которые затем могут использоваться для расчета изменения равновесных оценок состояния системы в ответ на управляющие воздействия.

Заключение

Предложенный метод моделирования, использующий экспертно-рефлексивный подход, позволяет принимать рациональные управленческие решения с учетом системного эффекта от взаимодействия большого количества факторов, отследить который в ручном режиме не представляется возможным, как в области денежно-кредитного регулирования [5], так и во многих других областях. Эти решения могут носить как оперативный, так и стратегический характер. В последнем случае для поиска решения можно использовать оптимизационную задачу с естественными ограничениями нормативного характера и с целевой функцией, коррелирующей со стратегической целью управления, в данном

случае – обеспечением устойчивого функционирования проектируемой системы.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: объектом анализа являются оценки влияния факторов, интерпретируемые как переменные многозначной логики; для построения транзитивного замыкания примитивных зависимостей предложены операции многозначной логики, являющиеся аналогом конъюнкции и дизъюнкции булевой алгебры; рассмотрены различные типы взаимодействий – по типу взаимозаменяемости и дополнительности; предложены процедуры верификации схем взаимодействия.

Литература

1. Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем: в 2-х кн./ под ред. В.Л. Шульца, В.В. Кульбы. – М.: Наука, 2012.
2. Кулинич А. А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления, 2010, №3, с. 2-16.
3. Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ./Науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009 – 360 с.
4. Гусев В.Б. Принятие решений в сильносвязанных структурах взаимодействия факторов и следствий. Труды конгресса по интеллектуальным системам и технологиям «AIS-IT'10». Научное издание в 4-х томах. – М.: Физматлит, 2010 – Т. 1, с. 124-130.
5. Гусев В.Б., Исаева Н.А. Экспертный анализ системного эффекта от взаимовлияний факторов кредитно-денежной политики для поддержки принятия решений на основе рефлексивных процедур линейного оценивания и логического вывода // Проблемы управления. 2014. №6. С. 59-67.

Гусев Владислав Борисович. Заведующий лабораторией Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Окончил Московский инженерно-физический институт в 1968 году. Кандидат физико-математических наук, доцент. Автор 115 печатных работ. Область научных интересов: науки об управлении, математическая экономика, прикладная математика. E-mail: gusvbr@mail.ru

Исаева Наталья Александровна. Заведующая лабораторией Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Окончила Горьковский государственный университет в 1976 году. Кандидат технических наук. Автор 75 печатных работ. Область научных интересов: науки об управлении, вычислительные системы, прикладная математика. E-mail: nat_i50@mail.ru