

МЕТОДЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ДАННЫХ ПРИ АНАЛИЗЕ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Гусев В.Б.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
gusvbr@ipu.ru

Аннотация. Предложен способ формализации модели сложного объекта с использованием экспертных данных. Сложный объект представляется в виде набора взаимодействующих компонент (факторов). Для численных характеристик отдельных взаимодействий компонент используются балльные оценки, которые, в зависимости от объекта исследования, могут интерпретироваться как степень риска, затраты времени, материальных ресурсов, степень влияния при взаимодействии компонент. Для каждого из перечисленных типов оценок применяются соответствующие вычислительные операции, а результатами расчетов являются балльные оценки системного ответа исследуемого объекта на внешние воздействия, формируемые в процессе счета как транзитивное замыкание первичных оценок. При расчетах оценок степени взаимодействия применяются многозначные логические переменные и операции многозначной логики. Приводятся примеры различных способов формализации.

Ключевые слова: модели сложного объекта, экспертные данные, балльные оценки, степень риска, затраты ресурсов, степень влияния.

Введение

Объектом анализа является сложный объект, представимый в виде набора взаимодействующих компонент. Информация об объекте носит экспертный (качественный или полуколичественный) характер. Цели формализации: получить исходную (первичную) модель функционирования сложного объекта.

Эта модель отображает его функциональные особенности и характеристики свойств сложного объекта как системы [1 - 3]. Первичная модель системы предназначена для расчетов отклика ее компонент на различные виды воздействий и различные условия ее функционирования (сценарии). Взаимодействие компонент объекта может описываться с помощью графов, матриц, формульных выражений. На основе первичной модели может быть построена модель полного отклика системы. Например, если мы работаем с системой, описываемой линейными операциями, то в качестве модели полного отклика мы получаем матрицу отклика сложного объекта на произвольную конфигурацию воздействий на компоненты объекта, учитывающую как первичные, так и косвенные воздействия (их транзитивное замыкание) [4].

Основными понятиями при формализации сложного объекта являются: факторы модели, которые соответствуют компонентам сложного объекта; взвешенный граф взаимодействия этих компонент (факторов); оценки степени влияния компонент, оценки рисков воздействия одних компонент на другие, оценки временных затрат (задержек), оценки затрат ресурсов (материальных, финансовых). При этом используется понятие примитивного (непосредственного) взаимодействия

факторов и понятие косвенных (опосредованных) влияний факторов (через факторы-посредники в транзитивных цепочках).

Рассматриваются следующие типы вычислительных операций при расчете вышеперечисленных взаимодействий:

- операции многозначной логики,
- линейные операции,
- операции с временными задержками
- операции с оценками затрат ресурсов.

Взаимодействие факторов реализуется последовательностью (поток) операций – последовательных или параллельных. Конечным результатом перечисленных операций является транзитивное замыкание взаимодействий.

Формализацию сложного объекта можно представить следующими этапами:

1. Выделение компонент или факторов, характеризующих функционирование сложного объекта
2. Определение типа связей между компонентами и их характера (взаимно компенсирующий, дополнительный, смешанный тип связей)
3. Определение или уточнения степени влияния в балльной шкале.
4. Представление схемы связей или взаимодействия в формализованном виде.

Процесс формализации сложного объекта является начальной стадией моделирования. Этот процесс начинается с подбора факторов, характеризующих рассматриваемую проблему и их классификации.

Можно наметить два взаимодополняющих подхода к решению проблемы отладки схемы связей:

- *верификация* шкал на основании синтеза общих соображений о свойствах разрабатываемой шкалы, специфике решаемой проблемы, свойствах рассматриваемого объекта, требованиях теории полезности,

Верификация шкал может рассматриваться с точки зрения критерия соответствия формируемой шкалы требованиям, предъявляемым к ней. Результатом верификации является шкала, соответствующая оптимальному значению этого критерия.

- *тестирование* численных значений соответствующих элементов схем оценивания на основании анализа реальных или мысленных прецедентов оценивания.

Процедура тестирования заключается в сопоставлении результатов их применения к некоторому (реперному) набору объектов с известными (эталонными) оценками. Ее можно рассматривать как обобщение процедуры измерения, состоящей в сопоставлении измеряемого объекта с эталоном. Степень соответствия тестируемой шкалы приемлемым значениям контролируется экспертом. На основе результатов тестирования можно делать выводы об адекватности исходных шкал, корректировать их, а также синтезировать шкалы с требуемыми качествами. К тому же будем различать два вида тестирования: априорное тестирование – качественная интерпретация значений оценочной шкалы на основе мысленных прототипов и апостериорное тестирование – сопоставление результатов оценивания с прецедентами прототипа (эталонными образцами, имеющими заданные значения оценок).

1 Построение шкал оценивания

Следует отметить, что в случае применения только линейных сверток процедуры оптимизации комплексной оценки дают малопримлемые результаты – переброску всех ресурсов в одну вершину. Это отражает тот факт, что линейное оценивание плохо отражает свойство функций полезности – их «насыщаемость». Линейная структура свертки относится только к полностью взаимозаменяемым факторам. Если такой взаимозаменяемости факторов нет, следует применять нелинейные свертки, например, получаемые по методу векторной стратификации. Поэтому применение n -арных линейных сверток можно оправдать лишь недостатком экспертной информации об объекте или отсутствием необходимости в более адекватных оценках при принятии решений.

Шкалы оценивания, используемые при принятии решений на основе непрерывных процедур ранжирования и оптимизации, должны, помимо упомянутых непрерывности и кусочной гладкости, удовлетворять ряду естественных требований, таких, как:

- *устойчивость*, когда малым изменениям показателей для любых факторов соответствуют малые изменения оценки состояния системы;
- *критичность*, когда существенным изменениям хотя бы некоторых показателей соответствуют существенные изменения оценки состояния;
- *соответствие*, когда значения показателей отражают специфику совместного влияния на состояние объекта оценивания (*компенсируемость либо дополнительность; степень симметрии влияния факторов*, имеющих различную степень важности или находящихся на разных уровнях иерархии графа оценивания);
- *конформность*, когда значения показателей влияют на оценку в соответствии со свойствами функций полезности (*монотонность, выпуклость*);
- *полнота*, когда весь диапазон оценок (значений шкалы) является достижимым при различных значениях показателей (параметров шкалы);
- *сепарабельность* факторов, используемых как входы к модели оценивания, т.е. относительно малая их взаимообусловленность, отсутствие детерминированной функциональной зависимости факторов оценивания;
- *соразмерность*, когда влияние факторов на состояние объекта соразмерно вкладу соответствующего параметра шкалы на изменение ее значений (близким по значимости факторам соответствуют близкие значения предельных оценок – частных производных шкалы по параметрам шкалы, и наоборот).

Перечисленные требования к процедуре оценивания могут выполняться в той или иной степени, зависимо от конкретной схемы оценивания и принятия решений. Пользователь этой схемы (эксперт; лицо, принимающее решения) формирует критерий качества оценивания, используя эти или другие требования в качестве основных факторов, имеющих измеряемые показатели.

2 Непрерывные шкалы многопараметрического оценивания

Под многопараметрической шкалой оценивания будем понимать функцию многих переменных $f(x)$, принимающую значения из определенного интервала $[I_0, I_1]$, интерпретируемые как оценки анализируемого объекта. Здесь x – вектор параметров оцениваемого объекта. Многопараметрические непрерывные шкалы занимают важное место при принятии решений на основе экспертных знаний. Так же, как и в теории полезности, обладающей разработанным теоретическим аппаратом, «узким местом» при использовании непрерывных шкал оценивания является методика их построения.

Одним из путей, облегчающих формирование многопараметрических шкал для практических приложений, является применение дискретных шкал с ограниченным числом градаций. В этом случае проблема формирования исходных оценочных шкал упрощается, так как сводится к работе с ограниченным множеством значений. Однако при этом, интерпретация результатов оценивания становится неустойчивой, поскольку малые изменения сравниваемых параметров объектов могут приводить к скачкообразным изменениям оценок. Непрерывные (принимающие непрерывный ряд значений) шкалы, с одной стороны, требуют более сложных и трудоемких процедур формирования этих шкал, а с другой стороны, упрощают ранжирование объектов и интерпретацию результатов оценивания. В частности, свойство непрерывности является необходимым в процедурах принятия решений на многопараметрических шкалах с использованием методов выпуклой оптимизации.

Построение многопараметрической шкалы оценивания методом сборки из элементарных шкал включает два вида локальных оценок. Значения параметров объекта оцениваются с помощью *однопараметрических шкал оценивания*

$$y_j = \varphi_j(x_j), j=1, \dots, m,$$

где m – количество оцениваемых факторов. Затем полученные оценки агрегируются с помощью *элементарных шкал с двумя или более параметрами* (аргументами). Эти шкалы являются функциями свертки, задаваемыми на основе экспертных оценок влияния факторов нижнего уровня i на факторы следующего по убыванию уровня иерархии $i-1$, $i = k, \dots, 1$, где k – наибольший номер уровня для схемы оценивания:

$$y^{i-1}_j = \psi_j(y^i_1, y^i_2, \dots).$$

В результате суперпозиции однопараметрических шкал и функций свертки всех вышестоящих уровней формируется *многопараметрическая шкала комплексного оценивания* как скалярная функция векторного аргумента

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$$

$$y^0 = f(x)$$

Численные реализации однопараметрических шкал могут задаваться с помощью таблиц или аналитически. Технологии построения бинарных и n -арных функций свертки могут быть различными, поскольку в случае бинарной свертки удобно использовать табличную форму функции (матрицу).

Непрерывность и кусочная гладкость многопараметрической шкалы комплексного оценивания обеспечивается интерполяцией внутренних шкал между узлами, задаваемыми экспертным путем.

В случае множественных агрегирующих связей можно пользоваться аналитическим заданием функций свертки. В частности, для линейной свертки оценок широкую известность получил метод анализа иерархий путем построения матриц парных сравнений.

3 Представление моделей

Обобщающую формулировку цели обеспечения жизнедеятельности и развития региона представляем в виде древовидной структуры подцелей (рис. 1.)

Жизнедеятельность и развитие Региона	
	Производство
	промышленность
	сельское и лесное хозяйство
	транспорт
	связь
	строительство
	прочие виды деятельности сферы материального производства
	Финансово-кредитная система
	Ставка рефинансирования
	Ставки по кредитам
	Межбанковские ставки
	Ставки по депозитам
	Дефлятор
	Спрос на деньги
	Предложение денег
	Эмиссия
	Жизнеобеспечение и демографическая ситуация
	социальное обеспечение, здравоохранение и физическая культура
	образование
	торговля и общественное питание
	жилищно-коммунальное хозяйство и непроизводственные виды бытового обслуживания
	уровень жизни населения
	миграционный прирост
	Управление
	Наука, культура и искусство

Рис. 1. Древовидная структура цели обеспечения жизнедеятельности и развития региона

Представленная выше древовидная структура позволяет сформировать комплексную оценку фактора, соответствующего корневой вершине (*Жизнедеятельность и развитие Региона*) в предположении сепарабельности и соразмерности факторов на концевых вершинах. Если между последними имеются взаимные зависимости, процедура расчета комплексной оценки должна их учитывать. Действительно, если оценка состояния какого-либо фактора получает приращение, то в

силу цепочки зависимостей приращение получают оценки факторов, входящих в транзитивное замыкание исходного фактора. Это должно отразиться и на значении комплексной оценки. Для учета эффекта взаимной зависимости факторов необходимо рассмотреть методы формализации влияния факторов друг на друга. Кроме того, системный анализ взаимных влияний позволяет отслеживать динамику реакции рассматриваемой системы, а также оценивать эффективность управляющих факторов.

Рассмотрим формализацию фрагмента *Финансово-кредитная система* представленной древовидной структуры более подробно. Этот фрагмент включает следующие факторы.

1. Ставка рефинансирования
2. Ставки по кредитам
3. Межбанковские ставки
4. Ставки по депозитам
5. Дефлятор
6. Спрос на деньги
7. Предложение денег
8. Эмиссия

Приведем пример предложенного метода формализации сложного объекта. Рассматриваемые факторы финансовой политики, влияют на показатели экономического роста. В определенных условиях часть этих факторов можно рассматривать в качестве инструментов управления со стороны государства. Оценки влияния факторов финансовой политики могут носить как краткосрочный, так и долгосрочный характер. Для получения прогноза оценок влияния необходимо учесть определенное количество первичных связей и косвенных влияний факторов. Предполагается, что оценки этих первичных связей могут быть заданы экспертным путем.

Для перехода к расчетам по модели необходимо конкретизировать вычислительные операции, которые отображают этапы взаимодействия компонент объекта.

Формульное представление схемы влияний факторов состоит из уравнений, правая часть которых содержит имена факторов с весами – балльными оценками влияния. Эти имена соединены знаками дизъюнкции \vee (означает независимое влияние факторов) или конъюнкции \wedge (применяется тогда, когда соответствующие факторы правой части оказывают влияние только в совокупности). Число, стоящее перед именем фактора в правой части, является балльной оценкой его влияния на фактор в левой части уравнения. Абсолютное значение веса означает верхнюю границу диапазона изменения фактора в левой части. Отрицательное значение веса фактора в правой части означает, что его увеличение приводит к уменьшению оценки фактора в левой части и наоборот. Таким образом, два отрицательных влияния, следующих один за другим в цепочке связей, дадут положительный эффект.

Описные выше свойства преобразования оценок позволяют интерпретировать их как объекты многозначной логики [4]. Операции над многозначными логическими переменными должны обобщать операции булевой алгебры.

Пример формульного представления схемы влияний представлен в табл. 1.

Таблица 1. Формульное представление схемы влияний.

Ставка рефинансирования = 5(Спрос на деньги (издержки)) \vee (-5) (Предложение денег)
Ставки по кредитам = 5(Межбанковские ставки) \vee 6(Ставки по депозитам) \vee (-6) (Предложение денег)
Межбанковские ставки = 5(Ставка рефинансирования) \wedge 7(Спрос на деньги)
Ставки по депозитам = 4(Межбанковские ставки)
Дефлятор (Индекс инфляции) = 6(Спрос на деньги)
Спрос на деньги = -6(Ставки по кредитам) \vee 5(Дефлятор (Индекс инфляции))
Предложение денег = 4(Ставки по депозитам) \vee 7(Эмиссия)
Эмиссия = -5(Предложение денег)

В таблице 2 приведено матричное представление схемы влияний. Здесь совокупное влияние факторов представляется группировкой коэффициентов матрицы. Каждая группа обозначается нечисловым (буквенным) постфиксом (окончанием) с фиксированным символом. Разные группы в строке имеют различные постфиксы.

Таблица 2. Пример матричного представления схемы влияний.

	Ставка рефинансирования	Ставки по кредитам	Межбанковские ставки	Ставки по депозитам	Дефлятор	Спрос на деньги	Предложение денег	Эмиссия
Ставка рефинансирования						5	-5	
Ставки по кредитам			5	6			-6	
Межбанковские ставки	5а					7а		
Ставки по депозитам			4					
Дефлятор						6		
Спрос на деньги		-6			5			
Предложение денег				4				7
Эмиссия							-5	

На рис. 2 представлен граф влияний. Сплошными стрелками обозначены положительные влияния, пунктирными стрелками – отрицательные влияния.



Рис. 2. Граф влияний

Транзитивное замыкание набора примитивных связей выполняется разными способами, соответствующими разным реализациям логических операций, а также разным горизонтам временного интервала прогнозирования.

Используются следующие процедуры верификации модели:

- расчет чувствительности модели по вариациям исходных данных (оценок взаимодействия факторов);

- обратная операция – расчет степени влияния оценок исходных факторов на заданный фактор;
- трассировка графа влияний факторов модели.

Интерпретация результатов и верификация модели взаимодействий заключается в следующем. Эксперт анализирует полный граф взаимовлияний факторов и сопоставляет их с реальными наблюдениями или с реальным опытом. Если есть расхождение, то проводится верификация модели с целью ее согласования с реальным опытом.

Заключение

Представленные подходы к формальному описанию сложных объектов и систем имеют следующие особенности. Они предполагают отсутствие исчерпывающей количественной информации об объекте. Качественную информацию об объекте как меру состояния и взаимодействия элементов системы можно оценивать с помощью баллов. Формализация является только первым шагом моделирования и принятия решений. Процесс моделирования использует как формализованную модель, так и расчет операций. Принятие решений на основе моделирования использует соответствующие критерии и методы выбора.

Разработанный метод формализации является новым, и применим для исследования сложных объектов различной природы. В частности, он может применяться в следующих областях: кредитно-денежная политика ЦБ [5], нематериальные активы [6], региональное развитие [7].

Литература

1. *Axelrod R.* The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites. Princeton: University Press, 1976.
2. Сценарный анализ динамики поведения социально-экономических систем / В.В. Кульба, Д.А. Кононов, С.С. Ковалевский, С.А. Косяченко, Р.М. Нижегородцев, И.В. Чернов (Научное издание). М.:ИПУ РАН, 2002. 122 с.
3. 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.
4. *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 / В.Б. Гусев, Н.А. Исаева // Проблемы управления. – 2014. – № 6. – С. 59-67.
5. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Метод рефлексивного оценивания взаимодействия факторов денежно-кредитной политики / В.Б. Гусев, Н.А. Исаева // Фундаментальные исследования. – 2013. – №10 часть 9. – С. 2005-2009.
6. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Анализ влияния нематериальных активов на инновационные процессы // Московский экономический журнал. 2016. №4. <http://qe.su/innovatsii-i-modernizatsiya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-4-2016-32/>.
7. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Рефлексивный анализ кредитно-денежной политики для крупномасштабной экономической системы / Труды 8-ой Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2015, Москва). М.: ИПУ РАН, 2015. Т.1. С. 165-171.