Метод экспертного дифференцированного сглаживания для оценки состояния сложных организационных систем

А.Г. Беленький, И.Н. Федосеева

Работа содержит введение в метод экспертного дифференцированного сглаживания для оценки состояния сложной организационной системы на заданный момент времени. Также представлено краткое описание особенностей обобщенной предметной области и методика определения надежности такого прогноза.

Введение

Существует широкий спектр задач, при решении которых необходимо оценить состояние какой-либо проблемы на определенный момент времени в будущем. К числу этих задач можно отнести изучение путей развития социально-экономических процессов, анализ кризисных ситуаций в политике и экономике, контроль за выполнением международных соглашений и ряд других. Данная работа посвящена одному из подходов к прогнозированию, дающему удовлетворительные результаты для данного класса задач.

Метод экспертного дифференцированного сглаживания использовался при создании прототипа интеллектуальной системы для оценки ядерной деятельности стран, разработанного для Международного агентства по атомной энергии.

1. Характеристики обобщенной предметной области

Для упомянутых выше проблем можно выделить некоторые общие характеристики, которые являются важными при выборе или разработке методов прогнозирования. Выделение таких характеристик позволяет вырабатывать единые универсальные методы прогнозирования для задач такого класса.

Определим некоторые свойства отношения информация – модель [1], которые необходимо учитывать при построении моделей сложных организационных систем.

Определение 1. Идеальной информационной моделью проблемы A назовем модель B, которая адекватно отражает структуру и логику A и в значениях оценок элементов которой учтена вся *возможная* информация об A.

Определение 2. Реальной информационной моделью проблемы A назовем модель C, структура и логика, которой аналогичны B и в значениях оценок элементов которой учтена вся информация об A *доступная* эксперту.

Пусть существует обобщенная предметная область A, а B ее идеальная информационная модель, состоящая из n элементов:

$$B = \{b_1, ..., b_n\}.$$

Обозначим через B_t состояние B в момент времени t:

$$B_t = \{b_{1t}, ..., b_{nt}\}.$$

Соответственно, состояние модели C в момент времени t будет C_t:

$$C_t = \{c_{1t}, ..., c_{nt}\}.$$

Состояние модели C обновляется экспертом при получении новой информации. Будем считать, что в момент времени t эксперт делает оценку C, на основе всей доступной ему в данный момент информации, в результате чего модель приходит в состояние C_t. Так как эксперт обычно получает информацию о C не мгновенно, а с некоторой задержкой, то элемент c_{tk} отражает состояние элемента b_{tk} с некоторым опозданием Δt. Для разных элементов модели C Δt может различаться. Соответственно, состояние модели C в каждый конкретный момент времени может адекватно отражать состояние A, а может, и нет.

Необходимо выделить следующие особенности, возникающие при оценке состояния A, учет которых важен при разработке методов прогнозирования:

- информация о состоянии предметной области A приходит к эксперту из различных источников с задержкой Δt, причем величина задержки для различных элементов A может быть различной;
- одна и та же информация может дублироваться в различных источниках;
- оценка элемента модели C в момент времени t является обобщенной в том смысле, что она делается не только на основе новой полученной информации, но, также интегрирует в себя всю предыдущую информацию.

Описание проблемы A с помощью модели, использующей одни только количественные характеристики, не всегда желательно и возможно. Учитывая данный факт и особенности организационных систем, во многих случаях используются качественные характеристики элементов предметной области. В этой связи также необходимо, что бы для модели было справедливо утверждение об адекватности.
Определение 3. Модель C является адекватно описывающей проблему A, если на основе оценки состояния A, полученной с использованием C, выработано адекватное управляющее решение [2].

2. Схема метода экспертного дифференцированного сглаживания

Как известно, задача прогнозирования заключается в том, чтобы видимые, выступающие на поверхности явления свести к действительному внутреннему (необходимому) движению. Отсюда следует,

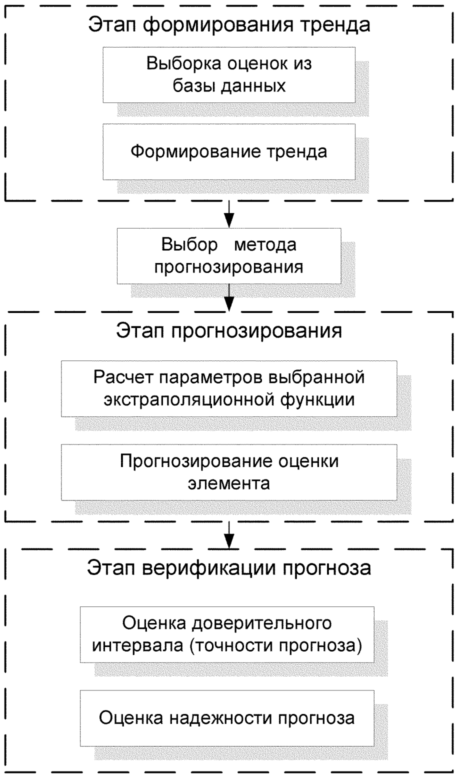

Рис. 1. Схема метода ЭДС.

что все виды прогнозирования можно рассматривать как приложение методов анализа объективных процессов к исследованию тенденций развития этих процессов. Тем самым становится целесообразным применять разнообразные методы обнаружения и экстраполяции преобладающей тенденции развития анализируемого объекта, использовать для прогнозирования найденные взаимосвязи показателей и закономерности их изменения.

Метод экспертного дифференцированного сглаживания (ЭДС) для прогнозирования оценки состояния сложной организационной системы включает в себя следующие этапы [1]:

- выбор элемента (элементов) модели предметной области;

- преобразование исходного ряда оценок;
- формирование тренда;
- выбор метода прогнозирования;
- расчет параметров выбранного метода;
- вычисление прогнозной оценки элемента (элементов);
- верификация полученных результатов.

Схема метода ЭДС отражена на рис.1.

2.1. Время жизни элемента

Элементом c_i модели C проблемы A может быть процесс, явление или объект. Каждый элемент модели c_i имеет свое «время жизни». Время жизни элемента не является постоянной величиной. Оно в различных условиях может принимать различные значения, а также динамически меняться с течением времени. Так, например, задержка с финансированием увеличивает время жизни процесса строительства.

Определение 4. *Время жизни элемента* (γ) – это период времени, за который процесс может пройти полный цикл развития [1].

Параметр *время жизни элемента* γ используется в методе ЭДС на следующих этапах:

- при формировании тренда,
- при выборе метода прогнозирования,
- при прогнозировании,
- при верификации прогноза.

Обычно точное значение времени жизни γ для каждого конкретного элемента эксперты назвать затрудняются. Однако у каждого элемента есть минимальное значение времени жизни $\gamma_{\min}$, за которое элемент может пройти полный путь развития при самых благоприятных условиях. Метод ЭДС позволяет анализировать динамику развития элемента и в зависимости от ее изменения вычислять действительное время жизни.

Сопоставление минимального и расчетного времени жизни элемента c_i позволяет сглаживать резкие изменения в значениях оценок и получать дополнительную информацию.

2.2. Этап отбора данных

Формирование исходного ряда оценок является одним из важных этапов подготовки данных для прогнозирования. Этап отбора данных представлен на рис. 2.

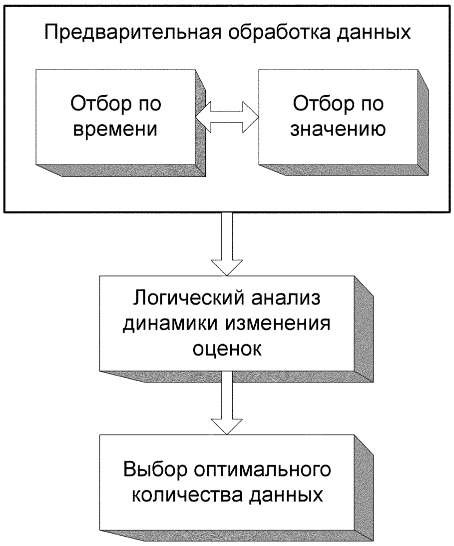

Рис. 2. Стадии отбора данных.

Пусть c_i - элемент модели C, оценку которого необходимо спрогнозировать и $Q_{C_i} = \left\{ q_{t_1}^{C_i}, q_{t_2}^{C_i}, \ldots, q_{t_k}^{C_i} \right\}$ – множество всех оценок этого элемента сделанных экспертом (здесь $k = |Q_{C_i}|$ – мощность множества Q_{C_i}). Тогда $\tilde{Q}_{C_i} = \left\{ \tilde{q}_{t_1}^{C_i}, \tilde{q}_{t_2}^{C_i}, \ldots, \tilde{q}_{t_l}^{C_i} \right\}$ – множество отобранных оценок на этапе отбора данных (здесь $l = \left| \tilde{Q}_{C_i} \right|$). Задачей этапа отбора данных является получение подмножества информативных оценок $\tilde{Q}_{C_i}$ из исходного множества всех оценок Q_{C_i} для последующего прогнозирования. Невозможность использования при прогнозировании всех элементов множества оценок, обусловлена свойствами информации, поступающей к эксперту.

На этапе отбора данных происходит предварительная обработка и преобразование исходных данных для облегчения выбора вида тренда путем сглаживания и выравнивания исходного ряда, а также логический анализ особенностей процесса. Здесь определяется оптимальное количество оценок, необходимых для проведения надежного прогноза, проводится непосредственный анализ множества оценок и их надежность, распознаются образы нестандартных ситуаций. На выходе этого этапа появляются данные, на основе которых можно строить прогноз развития элемента (элементов) предметной области.

Рассмотрим несколько возможных ситуаций на этапе отбора данных.

Ситуация 1. Пусть в течение дня эксперт получил m информационных сообщений, относящихся к одному и тому же элементу модели. Тогда, к концу дня в базу данных будут занесены несколько оценок состояния элемента модели $q_{t_{k-m}}^{C_i}, \ldots, q_{t_k}^{C_i}$, которые не отражают динамику развития элемента. Более того, последняя оценка дня $q_{t_k}^{C_i}$ интегрирует в себя всю полученную в течение дня информацию. В такой ситуации было бы разумно отбирать в тренд не все оценки, а только последнюю оценку дня. Такую ситуацию предлагается обрабатывать следующим образом.

Пусть A обозначает ситуацию, а Z_1 – действие:

$A:$ Имеется ряд оценок, сделанных в один день $q_{t_{k-m}}^{C_i}, \ldots, q_{t_k}^{C_i}$;

$Z_1:$ Отбираем последнюю оценку дня из этого ряда $\tilde{q}_{t_j}^{C_i} = q_{t_k}^{C_i}$.

Тогда правило вывода выглядит следующим образом:

ЕСЛИ:	ситуация A
ТО:	выполнить действие Z_1.

Ситуация 2. Эксперт получил информационное сообщение, подтверждающее последнюю имеющуюся оценку, и, поэтому, он не изменяет ее значение, то есть $q_{t_j}^{C_i} = q_{t_{j-1}}^{C_i}$. Следовательно, множество оценок пополняется новыми оценками, не отражающими динамику разви-

тия, а только лишь подтверждающими последнюю оценку. Эта ситуация обрабатывается следующим образом.

Пусть B, C, D обозначают ситуации, а Z_2 – действие:

$B:$ Имеется ряд последовательных оценок с одинаковым значением $q_{t_j}^{C_i} = q_{t_{j-1}}^{C_i} = \ldots = q_{t_{j-m}}^{C_i}$;

$C:$ Этот ряд находится в конце исходного набора данных, то есть $j = k$;

$D:$ Период времени между первой и последней оценкой этого ряда небольшой;

$Z_2:$ Отбираем самую раннюю оценку из этого ряда $\tilde{q}_{t_j}^{C_i} = q_{t_{j-m}}^{C_i}$.

Тогда правило вывода выглядит следующим образом:

ЕСЛИ:	(ситуация B) **И-НЕ** (ситуация C) **И** (ситуация D),
ТО:	выполнить действие Z_2.

Следующим этапом метода ЭДС является выбор метода прогнозирования.

2.3. Выбор метода прогнозирования

На основе сравнительного анализа существующих методов прогнозирования [1] для прогнозирования оценки состояния элементов модели A было решено использовать метод наименьших квадратов для краткосрочного прогнозирования и метод экспоненциального сглаживания для среднесрочного прогнозирования [3, 4].

При выборе метода прогнозирования оцениваются такие параметры как время упреждения прогноза, «время жизни» процесса, количество данных в созданном на предыдущем этапе множестве и др. и выбирается тип прогноза – краткосрочный или среднесрочный.

2.4. Этап прогнозирования

На этапе *прогнозирования* проводится непосредственный расчет параметров выбранного метода прогнозирования, анализируется динамика изменения оценок, обрабатываются исключительные ситуации, вносятся соответствующие коррективы в процесс прогнозирования и сглаживаются полученные результаты. В случае развития

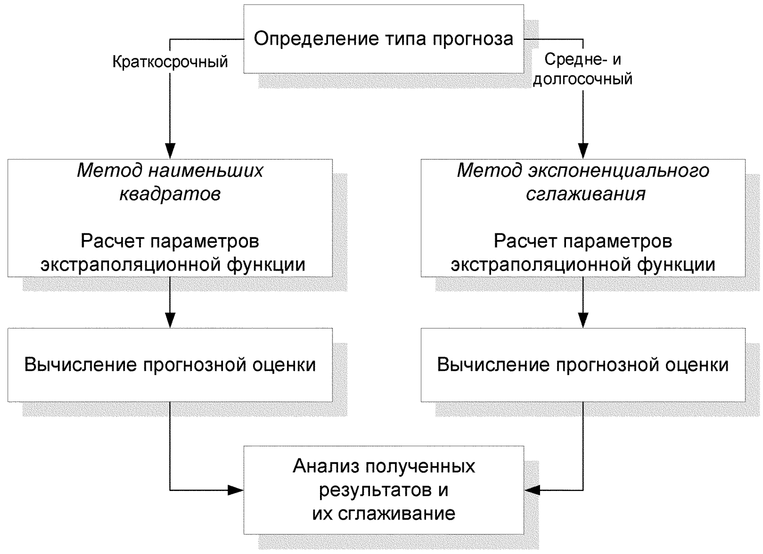

Рис. 3. Схема этапа прогнозирования.

различных неожиданных ситуаций в предметной области, (например, появление новой сенсационной информации о конкретном ее элементе) состояние элемента и значение оценки соответственно может качественно измениться. На этом этапе отслеживаются и такие ситуации. Схема этапа прогнозирования изображена на рис. 3.

3. Верификация прогноза

3.1. Оценка достоверности прогноза

На этом этапе определяется доверительный интервал прогноза (или точность) и его надежность. Достоверность прогноза тесно связана с доверительной вероятностью прогноза [4], однако для оценки качества прогноза вводится также понятие надежности прогноза. Под надежностью прогноза понимается степень уверенности в том, что оценка элемента модели примет спрогнозированное значение в заданный момент времени в будущем. Доверительный интервал прогноза вычисляется через среднее квадратическое отклонение (стандартное отклонение) фактических наблюдений от расчетных, полученных при выравнивании динамического ряда [4].

В общем виде доверительный интервал для тренда определяется как

$$\tilde{y}_t \pm t_\alpha s_{\tilde{y}},$$

где $s_{\tilde{y}}$ – средняя квадратическая ошибка тренда,
$\tilde{y}_t$ – расчетное значение y_t,
t_α – значение α-критерия Стьюдента.

3.2. Оценка надежности прогноза

Оценка надежности прогноза базируется на логическом анализе подмножества оценок $\tilde{Q}_{C_i}$, полученного после предварительной обработки исходного ряда. На надежность прогноза оказывают влияние такие параметры, как:

- наличие данных для прогнозирования;
- период времени между двумя последними оценками;
- монотонность изменения значений оценок;
- период упреждения прогноза;
- относительная скорость изменения последней оценки и др.

В данной статье рассматриваются только упомянутыми выше параметры.

Каждый из них вносит свой вклад в формирование надежности прогноза. Обозначим через r надежность прогноза. Пусть областью принимаемых r значений будет интервал $[0, 1]$, то есть $r \in [0, 1]$ (граничные значения которого 0 и 1 могут соответствовать наивысшей и наименьшей степени уверенности в результате прогноза соответственно).

Обозначим степень влияния количества данных для прогнозирования на надежность прогноза через d. Пусть областью принимаемых параметром d значений будет интервал $[0, 1]$, то есть $d \in [0, 1]$. Аналогично степень влияния

- периода времени между двумя последними оценками на надежность прогноза обозначим через g, $g \in [0,1]$;
- монотонности изменения оценок на надежность прогноза обозначим через m, $m \in [0,1]$;
- периода упреждения, делаемого прогноза на его надежность обозначим через u, $u \in [0,1]$;
- скорости изменения значения последней оценки относительно предыдущей обозначим через b, $b \in [0,1]$.

Пусть $r_d : \ r_d \in [0,1]$ – вес (вклад) параметра d в общую надежность прогноза. Аналогично $r_g : \ r_g \in [0,1]$, $r_m : \ r_m \in [0,1]$, $r_u : r_u \in [0,1]$, $r_b : r_b \in [0,1]$, – веса параметров g, m, u, b соответственно. Необходимо отметить, что сумма значений вкладов должна равняться 1, то есть

$$\sum_i r_i = 1, \text{ где } i \in \{d, g, m, u, b\}.$$

Тогда значение надежности r для прогноза вычисляется следующим образом:

$$r = 1 - r_d d - r_g g - r_m m - r_u u - r_b \beta.$$

Ниже описываются способы вычисления степеней влияния каждого параметра на надежность прогноза.

Степень влияния количества данных для прогнозирования d на надежность прогноза.

Очевидно, что при наличии не более одной оценки прогнозирование проводить не имеет смысла, так как невозможно выявить тенденцию. Чем больше оценок имеется, тем выше надежность прогноза.

Пусть N отражает количество данных, необходимых для проведения качественного прогноза. Будем считать, что при наличии данных больше чем N влияние этого параметра на надежность прогноза не учитывается. Значение параметра d вычисляется следующим способом:

$$d = \begin{cases} \sqrt{1-\left(\frac{K-2}{N-2}\right)^2}, & \text{если } N \geqslant K > 2; \\ 1 & \text{иначе;} \end{cases} \qquad (1)$$

Здесь N – число оценок, необходимых, для проведения прогноза; K – количество оценок, используемых для построения прогноза. $K = \min(N, l)$, где $l = \left|\tilde{Q}_{C_i}\right|$.

Таким образом, исходя из (1) видно, что если у нас имеется необходимое количество данных для прогнозирования, то значение параметра d равно нулю $d = 0$. Если же у нас есть всего две оценки, то значение параметра d будет равно 1.

Степень влияния периода времени между двумя последними оценками g на надежность прогноза.

Обозначим период времени между двумя последними оценками через Δt_n, $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$. Здесь t_n и t_{n-1} – моменты времени, когда были сделаны последняя оценка (n) и предпоследняя ($n-1$) оценка соответственно.

Если между двумя последними оценками прошло достаточно много времени, то в этот период могли произойти какие-либо качественные изменения в состоянии предметной области и, следовательно, надежность прогноза, основанного на существующих данных, снижается.

При вычислении значения g сопоставляется период времени между двумя последними оценками Δt_n со «временем жизни» процесса γ. Введем параметр t_p – промежуток времени, при котором можно считать прогноз надежным, то есть если $\Delta t_n \leq t_p$, то можно считать $g = 0$. Тогда значение g можно вычислять следующим образом:

$$g = \begin{cases} 0, & \text{если} \Delta t_n < t_p; \\ \frac{\Delta t_n - t_p}{\gamma - t_p}, & \text{если} t_p \leqslant \Delta t_n \leqslant \gamma; \\ 1 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Значение t_p может задаваться экспертом, однако в общем случае t_p зависит от времени жизни процесса γ. Авторами предлагается следующее соотношение $t_p = 0.05\gamma$ [1].

Степень влияния монотонности изменения оценок m на надежность прогноза.

Если значения оценок изменяются монотонно, то можно предположить, что элемент развивается стабильно и оценкам эксперта, основанным на имеющейся (поступающей) информации, можно доверять. Значит можно считать данные достаточно надежными и, следовательно, $m = 0$. Если же значения оценок меняются скачкообразно в различных направлениях, то надежность прогноза снижается.

Пусть m^+ – число «возрастаний» значений оценок:

$$m^+ = \sum_{i=1}^{k-1} m_i^+,$$

где k – число оценок, используемых для построения прогноза,
$m_i^+ = \begin{cases} 1, & \text{если } y_{i+1} \geqslant y_i, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$

Пусть m^- – число «снижений» значений оценок:

$$m^- = \sum_{i=1}^{k-1} m_i^-,$$

где k – число оценок, используемых для построения прогноза,
$m_i^- = \begin{cases} 1, & \text{если } y_{i+1} < y_i, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$

Тогда степень влияния монотонности изменения оценок на надежность прогноза m может определяться следующим образом:

$$m = \frac{2\min(m^+, m^-)}{k-1}.$$

Степень влияния периода времени между датой последней оценки и датой, на которую делается прогноз (период упреждения) на надежность прогноза.

Вполне возможны случаи, когда форма кривой, описывающей тенденцию, выбрана неправильно или когда тенденция развития в будущем может существенно измениться и не следовать тому типу кривой, который был принят при выравнивании. В последнем случае основное допущение экстраполяции не соответствует фактическому положению вещей. Найденная кривая лишь выравнивает динамический ряд и характеризует тенденцию только в пределах периода, охваченного наблюдением. Экстраполяция такого тренда неизбежно приведет к ошибочному результату, причем ошибку такого рода нельзя оценить заранее. В связи с этим можно лишь отметить то, что, по-видимому, следует ожидать рост такой погрешности (или вероятности ее возникновения) при увеличении периода упреждения прогноза.

Существует эмпирическое правило: чем больше период упреждения (период времени между датой последней оценки и датой, на которую делается прогноз), тем меньше надежность прогноза.

Пусть L – период упреждения, на который необходимо сделать прогноз. Обозначим через t_h (в общем случае $t_h \in [0, \gamma]$) – период упреждения, на который можно делать надежный прогноз. Тогда степень влияния периода упреждения на надежность прогноза u может вычисляться следующим образом:

$$u = \begin{cases} 0, & \text{если } L < t_h; \\ \frac{L - t_h}{\gamma - t_h}, & \text{если } t_h \leqslant L \leqslant \gamma; \\ 1 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Степень влияния скорости изменения последней оценки на надежность прогноза.

Если значение последней оценки резко меняется, то это означает, что в силу каких-то причин могли произойти какие-либо качественные изменения в состоянии предметной области. Поскольку вклад последней оценки при прогнозировании максимален, то надежность прогноза, основанного на существующих данных, снижается.

Обозначим через γ_{min} и γ_c соответственно минимальное и расчетное времена жизни процесса. Пусть β – скорость развития процесса. Так как скорость развития процесса обратно пропорциональна его времени жизни ($\beta = \frac{1}{\gamma}$), то максимальная скорость $\beta_{\max}$ и реальная (расчетная) скорость β_c вычисляются следующим образом:

$$\beta_{\max} = \frac{1}{\gamma_{\min}}, \qquad \beta_c = \frac{1}{\gamma_c}.$$

Обозначим через β_{last} – скорость изменения последней оценки:

$$\beta_{last} = \left| \frac{y_n - y_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right| .$$

Сопоставление скорости изменения последней оценки с максимальной и расчетной скоростями изменения оценок элемента позволяет увидеть резкие изменения в порядке протекания процесса и, следовательно, учесть их в вычислении надежности прогноза. Степень влияния скорости изменения значения последней оценки относительно предыдущей предлагается вычислять следующим образом:

$$b = \begin{cases} 1, & \text{если } \beta_{last} > \min(\beta_c, \beta_{\max}), \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

4. Вывод

В работе рассмотрены некоторые аспекты метода экспертного дифференцированного сглаживания при его использовании для прогнозирования оценки состояния сложной организационной системы.

Список литературы

[1] Беленький А.Г., Федосеева И.Н. Прогнозирование состояния динамических сложных систем в условиях неопределенности. М.: ВЦ РАН, 1999.

[2] Беленький А.Г. Семантическая переменная и ее использование в Интеллектуальных системах // Труды Всероссийской конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». Москва, 16–18 февраля 2000 г.

[3] Рабочая книга по прогнозированию. М.: Мысль, 1982.

[4] Кильдишев Г.С., Френкель А.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. М.: Статистика, 1973.