В.Г. ШЕРСТЮК

Метод оценки согласованности древовидных сетевых структур событий

УДК 004.986

Херсонский национальный технический университет, г. Херсон,

В работе рассмотрена задача оценки согласованности структур событий, формируемых в результате мониторинга динамическим объектом состояния сложной динамической системы. Предложена формализация правдоподобных сетевых структур событий, учитывающая неполноту и неточность наблюдений. Представлен метод оценки согласованности, основанный на отношении релевантности, который может быть использован в системах управления реального времени.

Системы управления динамическими объектами обрабатывают неполную и неточную информацию от нескольких независимых источников наблюдения [1] в условиях воздействия шумов и искажений, фиксируемую в форме *событий* $\mathbf{y}$ и *потоков событий* $[\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, ... \mathbf{y}_t]$. Для представления совокупностей наблюдаемых потоков событий используются как простые графовые модели, так и сложные структуры данных – дискретные и нечеткие ситуационные сети [2], ситуационно-событийные сети [3], сети Петри [4] и т.д.

В [5] для решения задач диагностики и предсказания критических ситуаций в системах управления эргатическими ДО предложено использовать древовидные структуры событий.

В данной статье рассматриваются вопросы оценки согласованности сложных древовидных структур, описывающих совокупность совместно наблюдаемых потоков событий, что играет важную роль для определения уместности использования решения в контексте складывающейся в процессе управления ситуации.

Цель работы состоит в синтезе эффективного метода оценки согласованности сложных структур событий в условиях неполной и неточной информации.

За основу можно принять представленную в [6] формализацию событийной модели E с явно заданным параметром времени, которая включает множества переменных и ограничений, а также сигнатуру $\mathcal{Z} = \langle X, \{Б_1 ... Б_m\}, T, <_T \rangle$, построенную над множествами параметров событий X, значений времени T, отношением полного порядка $<_T$ для T и множеством иерархий событий $Б = \{Б_1 ... Б_m\}$ (композиционной, таксономической и др.)

В основе каждой из иерархий $Б_i \in Б$ лежит отношение частичного порядка $\prec_i$, заданное на множестве элементов I_i, соответствующих определенному отношению w_i между событиями, такому что $x\ \mathrm{w}_i\ y \ \Rightarrow\ x, y \in I_i$.

Множество иерархий событий позволяет классифицировать исходную информацию таким образом, что потоки событий могут содержать элементы, относящиеся к различным уровням иерархий.

Формализация правдоподобной древовидной сети событий

Построим над событийной моделью E формальную модель древовидных сетей событий. Рассмотрим ориентированный связный мультиграф [7] $g = \langle \mathrm{v}, e \rangle$, не содержащий циклов, где v – множество вершин, e – множество дуг.

Непустое множество вершин v мультиграфа g разобьем на три непересекающихся множества: множество концевых узлов (листьев) $\mathrm{r} \subset \mathrm{v}$, множество корней, содержащих вершины наивысшего уровня $\mathrm{h} \subset \mathrm{v}$, и множество узлов b, не являющихся корнями или листьями, причем $g = \mathrm{h} \cup \mathrm{b} \cup \mathrm{r}$, $\mathrm{h} \cap \mathrm{b} = \mathrm{h} \cap \mathrm{r} = \mathrm{b} \cap \mathrm{r} = \varnothing$.

Непустое множество дуг e мультиграфа g разобьем на подмножества $e = e_{>_1} \cup e_{>_2} \cup ... \cup e_{>_n}$, каждое из которых отображает определенное отношение $\mathrm{w}_{>_1}, \mathrm{w}_{>_2}, ... \mathrm{w}_{>_n} \in \mathrm{W}$, заданное на v.

Для заданной модели событий E и потока событий $S = [\mathrm{y}_1, \mathrm{y}_2, ... \mathrm{y}_n]$, таких что $\mathrm{y}_i \in E.\mathcal{Z}$, *древовидной сетью событий* (ДСС) называется структура G вида:

$$G = \langle g, f, k\{>_i\}, t \rangle, \quad (1)$$

где g – ациклический связный мультиграф;

$f: r \to S$ – отображение каждого концевого узла ДСС из r в событие y из входного потока S;

$k: v \to 2^{E.z.X}$ – отображение каждого узла ДСС в множество параметров и ограничений из $E.z.X$;

$t: v \to T$ – отображение каждого узла ДСС на множество значений времени $E.z.T$;

$\{>_i\}$ – множество отношений частичного порядка $>_i$ на множестве узлов v, каждое из которых индуцировано отношением $w_{>_i}$ и выражается с помощью подмножества дуг $e_{>_i}$.

Корневые узлы ДСС $h \in h$ определяют множество последовательностей (потоков), состоящих из всех событий в концевых узлах $r \in r$, упорядоченных согласно $\{>_i\}$ и удовлетворяющих ограничениям, налагаемым k.

Неконцевые узлы $b \cup h$, $b \in b$, $h \in h$ представляют значимые потоки событий, представленных концевыми узлами r.

ДСС может использоваться для формализации частично упорядоченных совокупностей событий, происходящих одновременно и совместно, при этом концевые узлы отображают элементарные (наблюдаемые) события, неконцевые – соответствуют агрегатным событиям (последовательностям элементарных событий), а корневые узлы ведут к целям.

Дуги ДСС отражают множество отношений W, в частности, таксономическую иерархию (CLASS-OF) $w_{>_1}$, композиционную иерархию (PART-OF) $w_{>_2}$, временные отношения t и др.

Соответственно, множество дуг ДСС e разбивается на подмножества $e = e_{>_1} \cup e_{>_2} \cup e_t$. Наличие перехода (дуги $e_{>_i} \in e$) между двумя узлами ДСС является отражением некоторого отношения $w_{<_i}$ между событиями, изображаемыми данными узлами.

Особенность представленной формализации ДСС состоит в возможности расширения множества отношений W между событиями отношениями w_k путем дополнения e соответствующим подмножеством дуг e_k и введения в структуру ДСС соответствующего отношения порядка $>_k$.

На основе предложенной формализации ДСС возможно классифицировать каждое событие y^S, определив его положение в иерархии $E.\mathfrak{z}.Б_i$; установить порядок $>_T$ и состав $>_2$ событий; установить ограничения k на параметры событий x; определить соответствие наблюдаемой последовательности событий заданному эталону.

ДСС должны строиться с учетом факторов неполноты и неточности наблюдений, для чего может быть использована модель правдоподобия [5] μ, позволяющая приписать всякой дуге ДСС оценки (доверия, возможности, вероятности) $l_i \in L$, выражающие степень наличия отношения $w_{<_i}$ между двумя узлами ДСС, соединяемыми данной дугой.

Для заданной модели событий E и потока событий $S = [y_1, y_2, ... y_n]$, таких что $y_i \in E.\mathfrak{z}$, *правдоподобная древовидная сеть событий* (ПДСС) $\tilde{G}$ представляет собой структуру вида:

$$\tilde{G} = \langle g, f, k, \mu, \{>_i, \phi_i\} \rangle, \qquad (2)$$

где g, f, k, $\{>_i\}$ составляют ДСС G;

μ – модель правдоподобия;

$\phi_i : e_j \xrightarrow{l_j} \ell$ – отображение, помечающее каждую дугу $e_j \in e_{>_i}$ оценкой правдоподобия l_j на некоторой шкале $\ell \in$μ.

Важной особенностью ПДСС является использование собственного отображения ϕ_i для каждого отношения $w_{>_i} \in W$, приписывающего определенные оценки $l \in [0..1]$ относительно $\ell \in$μ каждой дуге из подмножества дуг $e_{>_i} \in e$, соответствующего отношению $w_{>_i}$.

На рис. 1 представлен фрагмент нечетко-временной (*FT*)-ПДСС.

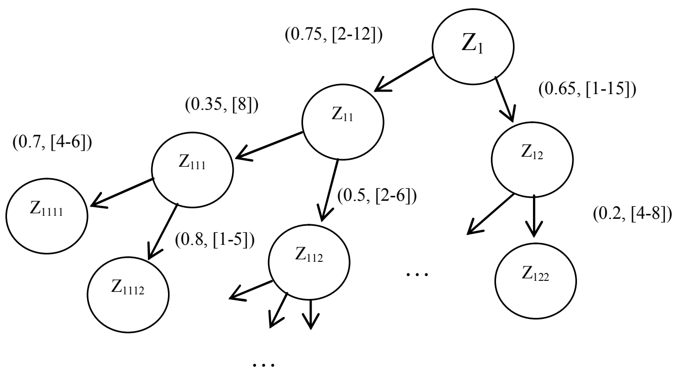

Рис. 1. Фрагмент FT-ПДСС

Агрегатное событие Z_{111} представляет собой последовательность из события Z_{1111} и возможно (с нечеткой оценкой 0,7) следующего за ним с допустимым интервалом от 4 до 6 минут события Z_{1112}. Если Z_{111} является составной частью абстрактного события Z_{11}, то возможно (с нечеткой оценкой 0,8) в течение интервала от 1 до 5 минут должно произойти событие Z_{112}.

Предложенную формализацию ПДСС можно рассматривать как абстракцию известной модели сети доверия (Belief Network) [8]. Так, в случае использования нечетких оценок доверия имеется аналогия с нечеткими Байесовскими сетями, в случае вероятностных оценок – аналогия с вероятностными Байесовскими сетями [9].

Важной особенностью ПДСС является эффективность вывода – известно, что сложность вывода на них линейно зависит по времени от размера имеющейся сети [10].

Модель релевантности элементов древовидных структур

Понятие релевантности впервые представлено в работах [11, 12] как уместность одного объекта относительно другого.

Построим модель релевантности ПДСС.

Рассмотрим абстрактную, организованную [13] и находящуюся в стабильном состоянии структуру, состоящую из упорядоченного множества потоков событий, описывающих переходы динамической системы из состояния в состояние в виде изменения значений параметров $\{x_1,...x_m\}$ на множестве значений X, и формирующих структуру через множество отношений $\mathsf{W} = \{\mathsf{w}_i\}$, упорядоченных согласно $\mathrm{C} = \{>_i\}$. Таким образом, указанная структура полностью соответствует представленному выше определению ДСС G.

Предположим, что множества X и W – конечны.

Отношения $w_i, w_j \in W$ между вершинами ДСС G назовем *независимыми* друг от друга, если и только если ни одно отношение w_i не может быть представлено с помощью других отношений w_j и ни одно отношение w_j не влияет на другие отношения $w_i \in W$.

ДСС G назовем *полностью организованной*, если она находится в стабильном состоянии, когда все отношения $w_i \in W$ определены на каждой паре элементов множества $(x_i, x_j) \in X$.

Композиционная иерархия $w_{>_2}$ позволяет рассматривать ДСС как составную структуру, включающую в качестве элементов иные древовидные структуры. *Поддеревом* (*кустом*) Ў ДСС G назовем часть древовидной структуры, которую можно представить в виде отдельного дерева, где корнем Ў является один из неконцевых узлов ДСС $y \in b$ вместе со всеми своими узлами-потомками.

В дальнейшем изложении будем предполагать, что *элементом структуры* может являться любая из вершин $x \in v$ или любой куст Ў $\in g$ с корнем $y \in b$.

Если используется структура, представляющая собой ДСС, отношениям $w_i \in W$ присваиваются оценки $l_i = \{0,1\}$, выражающие наличие (1) или отсутствие (0) отношения. Если же используется формализм ПДСС, оценки могут принимать значения на промежутке [0,1], т.е. $l_i \in [0,1]$, что дает возможность использования нечетких, приближенных или вероятностных моделей правдоподобия.

Примем, что рассматриваемая структура представляет собой ПДСС, в которой оценка отношений $w_i \in W$ имеет нечеткое значение на промежутке [0,1] (*F*-ПДСС).

Соответственно,

$$\forall w_i \in W \ : X \times X \to [0,1]. \qquad (3)$$

Для каждого частичного отношения порядка $>_i \in \mathrm{C}$ введем соответствующую операцию композиции $\gamma_{\triangleright_i}$ [14].

Тогда

$$\mathsf{w}_i = \left\{ \gamma_{\triangleright_j} \right\},\ \mathsf{w}_i \in \mathsf{W},\ \triangleright_j \in \mathrm{C}\ . \qquad (4)$$

Разобьем множество X на некоторое подмножество областей $B_1,...B_n$, каждая из которых состоит из подмножества значений параметров $\{x_1,...x_m\}$ на множестве значений X.

Обозначим как $p(X)$ множество всех областей в X, таких что $p(X)=\{B_1,...B_n\}\subseteq X$.

Пусть каждая область B_j представляет собой нечеткое множество, где функция принадлежности $\mu_{B_j}(x_i)\in X$ понимается как степень значимости элемента $x_i\in X$ в описании B_j.

Тогда подмножеством B_j множества X назовем множество упорядоченных пар [15], таких что

$$\left\{\left(x_i, \mu_{B_j}(x_i)\right)\right\} \quad \forall x_i \in X,\ x_i \underset{\mu_{B_j}}{\rightarrow} [0,1]. \qquad (5)$$

Некоторые состояния из X могут входить в описания сразу нескольких подмножеств $B_j, B_k \in p(X)$.

Областью схожести подмножеств $B_j, B_k \in p(X)$ назовем их пересечение $B_j \cap B_k$, функция принадлежности которого имеет вид

$$\forall x_i \in X : \mu_{B_j\cap B_k}(x_i)=\min\left(\mu_{B_j}(x_i), \mu_{B_k}(x_i)\right) \ . \qquad (6)$$

Степенью несовместимости назовем расстояние Хемминга между B_j и B_k:

$$d\left(B_j, B_k\right) = \sum_{i=1}^{n}\left(\mu_{B_j}(x_i) - \mu_{B_k}(x_i)\right) \ , \qquad (7)$$

где $n=|X|$.

Для практического применения удобнее использовать *относительное расстояние Хемминга* вида:

$$\delta\left(B_j, B_k\right) = \frac{1}{n} d\left(B_j, B_k\right) \ , \qquad (8)$$

обладающее следующими свойствами [16]:

1) $\delta(B_1,B_2)=0 \ \Rightarrow\ B_1=B_2$;

2) $\delta(B_1,B_2)=1 \ \Rightarrow\ B_1\cap B_2=\varnothing$.

Введем в рассмотрение понятие транзитивных цепочек.

Транзитивной цепочкой назовем путь $\rho(x,y)$ от одного элемента x к другому элементу y на мультиграфе g ПДСС $\tilde{G}$, соответствующий заданному отношению $w_i \in W$.

Образование транзитивных цепочек в ПДСС $\tilde{G}$ показано на рис. 2, где структура задана на множестве состояний $X = \{x, y, z_1, z_2\}$ и множестве отношений, состоящем из единственного элемента $W = \{w\}$, причем w – отношение транзитивное.

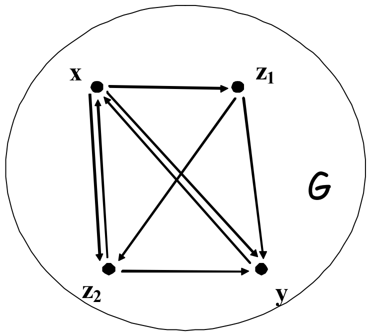

Рис. 2. Процесс определения транзитивных цепочек в G

Для определения релевантности двух элементов x и y необходимо выделить множество возможных связей между ними.

Связи между элементами x и y ПДСС $\tilde{G}$ имеют два вида:

- *прямая* связь, когда нечеткое отношение определено на паре (x,y);

- *косвенная* связь, когда вершины связаны транзитивной цепочкой.

Косвенные связи могут поддерживаться исключительно на основе транзитивных отношений множества W^T. На рис. 2 в ДСС G между элементами x и y существуют следующие цепочки связей: одна прямая связь $\{x,y\}$; косвенная связь $\{x,z_1\},\{z_1,y\}$; косвенная связь $\{x,z_1\},\{z_1,z_2\},\{z_2,y\}$; косвенная связь $\{x,z_2\},\{z_2,y\}$.

Таким образом, выборка всех возможных цепочек $\rho_i(x,y)$ соответствует множеству путей в структуре мультиграфа g из элемента x в элемент y, соответствующих отношению w. Будем обозначать их как $w(x,y)$, $w(x,z_1,y)$, $w(x,z_1,z_2,y)$, $w(x,z_2,y)$.

Поскольку ПДСС $\tilde{G}$ является ациклической, в транзитивных цепочках не может быть петель, при их построении необходимо соблюдать *правило* – один и тот же элемент не может входить в одну и ту же цепочку больше одного раза.

Таким образом, транзитивная цепочка представляет собой упорядоченное подмножество вершин, входящих в путь $\rho(x,y)$, от исходной вершины x к конечной вершине y.

Для определения релевантности элементов x и y важно знать не только множество элементов, через которые проходит путь $\rho(x,y)$, а и значения отношений порядка на конкретных парах элементов, для которых строится транзитивная цепочка.

Множество цепочек между элементами x и y по всем отношениям $\mathsf{w} \in \mathsf{W}$ обозначим как q. Множество транзитивных цепочек по отношению w обозначим как q^{w}. Каждый элемент множества q^{w} представляет собой частично упорядоченное подмножество, характеризующее конкретную цепочку.

Тогда множество всех цепочек Q является объединением множеств цепочек, соответствующих всем отношениям, принадлежащим множеству W:

$$Q = \bigcup_{\mathsf{w}_i \in \mathsf{W}} q^{\mathsf{w}_i}.$$

Отношением релевантности назовем бинарное отношение, определенное на множестве пар элементов, принадлежащих области B:

$$\mathbf{Rel}: B \times B \to [0,1]. \tag{9}$$

Если оценка релевантности принимает нулевое значение, это означает, что элементы x и y не имеют связей, соответственно и никакого взаимного влияния друг на друга оказывать не могут.

Единичное значение оценка релевантности принимает исключительно в том случае, когда x и y являются одним и тем же элементом ПДСС $\tilde{G}$ ($\mathbf{REL}(x,x)=1$).

Предположим, что для каждого элемента области B существует некоторое подмножество элементов, появление которых является условием появления x.

Множество O_x назовем *релевантным окружением* элемента x, если функция принадлежности $\mu_{O_x}(x_j)$ представляет значимость элемента из O_x в появлении x. Для элементов x и y области B отношение релевантности рассматривается как функция значимости элемента y в появлении элемента x.

Два элемента $x, y \in B$ называются *непосредственно релевантными* друг другу, если и только если $y \in O_x$.

Два элемента $x, y \in B$ называются *косвенно релевантными* друг другу, если они связаны между собой через транзитивную цепочку $\rho = \{x, z, y\}$, такую что $y \notin O_x$, $y \in O_z$, $z \in O_x$.

Релевантное окружение элемента x области B показано на рис. 3.

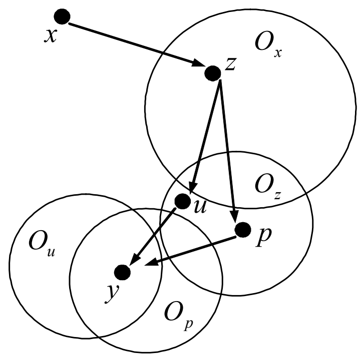

Рис. 3. Определение релевантного окружения элемента *x*

В случае прямой релевантности ее оценка определяется как

$$\mu_{\boldsymbol{Re1}}(x, y) = \mu_{O_x}(y) = \delta(x, y). \tag{10}$$

В случае косвенной релевантности ее оценка несколько сложнее. Вначале определим множество транзитивных цепочек $Q = \{\rho_1, \ldots \rho_m\}$, ведущих от элемента x к элементу y.

Для каждого из путей $\rho_i \in Q$ построим последовательность вершин $\langle v_{1i}, \ldots v_{ji}, \ldots v_{ki} \rangle$, ведущую от начальной вершины $v_{1i} = x$ в конечную вершину $v_{ki} = y$.

Далее согласно (9) оценим взвешенное относительное расстояние между элементами x и y по каждому из путей $\rho_i \in Q$:

$$\delta(\rho_i)=\frac{1}{(k-1)}\sum_{j=1}^{k-1}\delta\left(v_{ji},v_{(j+1)i}\right). \qquad (11)$$

Затем исходя из $\delta(\rho_i)$ вычислим оценки релевантности по каждой из цепочек $\rho_i \in Q$:

$$\mu_{Rel}(\rho_i)=\frac{1}{\delta(\rho_i)}, \qquad (12)$$

что позволит получить оценку степени релевантности между элементами x и y как

$$\mu_{Rel}(x,y)=\max_{i=1}^{m}\left(\mu_{Rel}(\rho_i)\right). \qquad (13)$$

Используя представленную модель релевантности элементов структуры, формализуем отношение согласованности на ПДСС.

Оценка согласованности элементов ПДСС

Пусть Q – множество всех возможных путей $\{Q_i\}$ из x в y.

Наибольшее влияние на степень релевантности некоторого элемента будут иметь те элементы структуры, которые напрямую связаны с данным элементом, т.е. для которых $\left|Q_i^{w}\right|=1$.

При увеличении длины транзитивной цепочки влияние ее на степень релевантности должно уменьшаться. Чем длиннее транзитивная цепочка, тем меньше взаимосвязь элементов.

Определим отношение согласованности по отношению w.

Оценка согласованности относительно некоторой цепочки $\boldsymbol{Conf}(Q_j)$ формируется последовательной композицией оценок элементов цепочки Q_j с помощью операции композиции γ_{w}, соответствующей отношению w.

Оценка согласованности по цепочке Q_j может иметь вид:

$$\boldsymbol{Conf}_{w}^{Q_j^{w}}(x,y)=\frac{1}{\left|Q_j^{w}\right|}\prod_{k=1}^{\left|Q_j^{w}\right|}\gamma_{w}\left|q_k\right|, \quad \forall q_k \in Q_j^{w}. \qquad (14)$$

Степень согласованности элементов x и y определяется как

$$\mu_{Conf}(Q_i)=\prod_{j=1}^{|Q_i|}\mu_{\mathrm{Rel}}\left(Q_j\right). \qquad (15)$$

Если $\left|Q_i\right|=1$, то x и y являются согласованными.

Определим оценку согласованности следующим образом:

$$\boldsymbol{Conf}(x,y)=\begin{cases}0,\ \text{если}\ |Q|=0\\ \dfrac{1}{|Q|}\sum\limits_{i=1}^{|Q_i|}\prod\limits_{j=1}^{|Q_j|}\mu_{\boldsymbol{Rel}}\left(Q_j\right),\ \text{если}\ |Q|>0\\ 1,\ \text{если}\ x=y\end{cases}. \tag{16}$$

С увеличением количества элементов в пути Q_i соответственно уменьшается значение $\mu_{\boldsymbol{Rel}}\left(Q_i\right)$ и, как следствие, уменьшается степень согласованности элементов x и y.

Условие:

$$\forall Q_i,Q_j\in Q:\left|Q_i\right|\geq\left|Q_j\right|\Rightarrow\mu_{\boldsymbol{Rel}}\left(Q_i\right)\leq\mu_{\boldsymbol{Rel}}\left(Q_j\right) \tag{17}$$

задает отношение нестрогого порядка на множестве Q.

В предыдущих выкладках предполагалось, что все отношения $w_i\in W$ являются равноправными в $\tilde{G}$ и одинаково влияют на согласованность одного элемента структуры с другим.

Однако, чаще всего это не так. Необходимо рассмотреть, каким образом некоторый элемент x ПДСС $\tilde{G}$ интегрирован в нее, и как повлияет на характеристики структуры изменение характеристик одного или нескольких других ее элементов.

Как видно из (16), согласованность носит аддитивный характер, т.е. общее значение согласованности складывается из оценок согласованности по независимым отношениям w_i, которые в свою очередь складываются из оценок согласованности по независимым транзитивным цепочкам, которые представляют собой оценки релевантности $\mu_{\boldsymbol{Rel}}\left(\rho_i\right)$ по соответствующим путям ρ_i.

Согласованность некоторого элемента x со структурой $\tilde{G}$ складывается из значений оценок согласованности этого элемента со *всеми* другими элементами структуры:

$$G'^{\tilde{G}}_{\boldsymbol{Conf}}(x)=\sum_{x_i\in X,\ x_i\neq x}\boldsymbol{Conf}(x,x_i),\ x\in X. \tag{18}$$

Назовем функцию $G'^{\tilde{G}}_{\boldsymbol{Conf}}(x)$ *оценкой влияния элемента* x на структуру $\tilde{G}$, принимающей значения на промежутке $[0,1]$ [17].

Если $G'^{\tilde{G}}_{Conf}(x)=0$, изменение характеристик элемента x_i никак не повлияет на характеристики структуры $\tilde{G}$, однако несимметричность отношения релевантности не позволяет утверждать обратное.

Введем *оценку влияния структуры* $\tilde{G}$ на элемент x, для чего изменим направление отношения согласованности – не от элемента x к другим элементам структуры x_i, а наоборот, от элементов x_i структуры $\tilde{G}$ к элементу x.

Тогда

$$G''^{\tilde{G}}_{Conf}(x)=\sum_{x_i\in X,\ x_i\neq x}\boldsymbol{Conf}(x_i,x),\ x\in X. \tag{19}$$

Определим *степень интеграции* элемента x в структуру $\tilde{G}$:

$$G^{\tilde{G}}_{Conf}(x)=\frac{G'^{\tilde{G}}_{Conf}(x)+G''^{\tilde{G}}_{Conf}(x)}{2}, \tag{20}$$

которую можно рассматривать как *оценку значимости* некоторого элемента x для структуры $\tilde{G}$.

Определим также *оценку организованности* структуры $\tilde{G}$:

$$G^{\tilde{G}}_{Org}=\frac{\sum_{i=1}^{|X|}\sum_{j=1}^{|X|}\mathbf{Rel}(x_i,x_j)}{\left|X^2\right|-|X|},\ \forall x_i,x_j\ \ x_i\neq x_j, \tag{21}$$

для чего исключим все вхождения рефлексивных отношений релевантности вида $\mathbf{Rel}(x,x)$.

Оценка $G^{\tilde{G}}_{Org}$ показывает, насколько структура $\tilde{G}$ устойчива и насколько чувствительна к изменениям, связанным с динамикой. Чем больше будет оценка $G^{\tilde{G}}_{Org}$, тем более значительными будут последствия от любого изменения структуры $\tilde{G}$, в частности, рассогласование уже устоявшихся связей, нарушение сбалансированности структуры и т.д.

Рассмотрим вопросы взаимосвязи и взаимозависимости двух ДСС $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$, организованных соответственно на множествах X_1 и X_2, элементы которых x_{1i} и x_{2i} связаны между собой множествами отношений W_1 и W_2.

Для $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$ возможны следующие ситуации:

- если $X_1 \cap X_2 = \varnothing$, структуры $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$ *независимы* друг от друга;

- если $X_1 \cap X_2 \neq \varnothing$, согласованность структур $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$ определяется согласованностью элементов множества $X_{1,2} = X_1 \cap X_2$ и элементами обоих структур, не входящими в $X_{1,2}$.

Элементы множества $X_{1,2}$ имеют связи (через соответствующие отношения $w_i \in W_1, w_j \in W_2$) как со структурой $\tilde{G}_1$, так и со структурой $\tilde{G}_2$, т.е. $X_{1,2}$ является связующим. Соответственно, согласованность одной структуры с другой будет зависеть только от согласованности элементов, входящих во множество $X_{1,2}$.

Схематично определение согласованности структур $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$ показано на рис. 4.

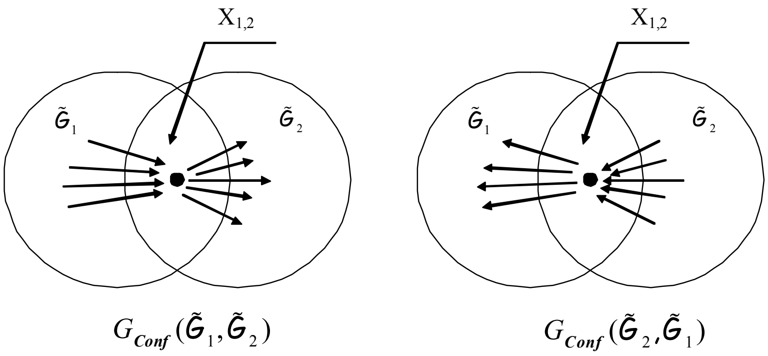

Рис. 4. Схема определения согласованности структур $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$

Ввиду несимметричного характера отношения релевантности, оценка согласованности структуры $\tilde{G}_1$ со структурой $\tilde{G}_2$ будет отличаться от оценки согласованности структуры $\tilde{G}_2$ со структурой $\tilde{G}_1$, т.е. $G_{Conf}(\tilde{G}_1,\tilde{G}_2) \neq G_{Conf}(\tilde{G}_2,\tilde{G}_1)$, как показано на рис. 4.

Рассмотрим согласованность структур по каждому из элементов множества $X_{1,2}$. Пусть $x \in X_{1,2}$, где $X_{1,2} = X_1 \cap X_2$.

Согласованность структур по элементу x будет состоять из двух слагаемых:

- согласованности элемента x со всеми элементами структуры $\tilde{G}_2$, не входящими в множество $X_{1,2}$,

- согласованности всех элементов $\tilde{G}_2$, не входящих в $X_{1,2}$, с элементом x.

Получим:

$$G^{(x)}_{\boldsymbol{Conf}}(\tilde{G}_1,\tilde{G}_2)=\sum_{x_i\in X_2-X_{1,2}}\boldsymbol{Conf}(x,x_i)+\sum_{x_i\in X_1-X_{1,2}}\boldsymbol{Conf}(x_i,x). \qquad (22)$$

Теперь можно определить оценку согласованности структур $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$ по всем составляющим их элементам x_i:

$$G'_{\boldsymbol{Conf}}(\tilde{G}_1,\tilde{G}_2)=\sum_{x_i\in X_{1,2}}G^{(x_i)}_{\boldsymbol{Conf}}(\tilde{G}_1,\tilde{G}_2). \qquad (23)$$

Однако, следует учитывать, что отношение мощности множества $X_{1,2}$ к мощности множества X_1 прямо пропорционально согласованности структур $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$, т.к. определяет степень включения множества X_1 в множество $X_{1,2}$.

Оценку согласованности двух структур $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$ можно представить как:

$$G_{\boldsymbol{Conf}}(\tilde{G}_1,\tilde{G}_2)=$$
$$=\frac{|X_{1,2}|}{|X_1|}\cdot\sum_{x_i\in X_{1,2}}\left(\sum_{x_j\in X_2-X_{1,2}}\boldsymbol{Conf}(x_i,x_j)+\sum_{x_j\in X_1-X_{1,2}}\boldsymbol{Conf}(x_j,x_i)\right), \qquad (24)$$

где $\boldsymbol{Conf}(x_i,x_j)$ можно получить на основе (14).

Оценку $G_{\boldsymbol{Conf}}(\tilde{G}_1,\tilde{G}_2)$ можно рассматривать как оценку согласованности двух структур $\tilde{G}_1$ и $\tilde{G}_2$, представляющих собой ПДСС, либо как отношение уместности одной из структур относительно другой.

Выводы

Представлена формализация правдоподобной древовидной сети событий, основанная на совместном представлении множества иерархий потоков событий в виде мультиграфа сложной структуры, и используемая для формализации частично упорядоченных совокупностей совместно происходящих событий.

Предложена формальная модель отношения релевантности, используемая для вычисления оценки согласованности правдоподобных древовидных сетей событий.

Представленный в работе метод оценки согласованности обладает достаточной для работы в системах реального времени эффективностью в силу линейной зависимости времени вывода от размера имеющейся древовидной структуры.

Литература

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.

2. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.

3. Борисов В.В., Зернов М.М. Реализация ситуационного подхода на основе нечеткой иерархической ситуационно-событийной сети // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. №1. С.17-30.

4. Зазнова Н.Е., Редько В.А. Исследование систем обработки полетной информации с помощью временных сетей Петри // Автоматика и вычислительная техника. 2004. №1. С.53-59.

5. Шерстюк В.Г. Сценарно-прецедентное управление эргатическими динамическими объектами. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. 407p.

6. Шерстюк В.Г. Метод динамической оценки подобия двух потоков событий // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2013. №2(24). С.82-103.

7. Харари Ф. Теория графов. М.: КомКнига, 2006. 296с.

8. Pearl J. Fusion, propagation and structuring in belief networks // Artificial Intelligence. 1986. Vol.29. №3. Pp.241-288.

9. Darwiche A. Modeling and Reasoning with Bayesian Networks. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 526 p.

10. Kocka T., Zhang N.L. Effective Dimensions of Partially Observed Polytrees // Proc. Of The European Conf. on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty, 2003. – Pp.311-322.

11. Фестингер Л. Введение в теорию диссонанса // Современная зарубежная социальная психология. М.: Изд-во МГУ. 1984. С.97-110.

12. Аронсон Э. Теория диссонанса: прогресс и проблемы // Современная зарубежная социальная психология. М.: Изд-во МГУ. 1984. С.111-126.

13. Лефевр В.А. Конфликтующие структуры. М.: Советское радио. 1974. 272 с.

14. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука. 1986. 311 с.

15. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь. 1982. 432 с.

16. Рыжов А.П. Элементы теории нечетких множеств и измерения нечеткости. М.: Диалог-МГУ, 1998. 81 с.

17. Силов Б.В. Принятие стратегических решений в нечёткой обстановке. М.: ИНПРО-РЕС, 1995. 228 с.

E-MAIL: V_SHERSTYUK@BIGMIR.NET