

УДК 004.9:623.1

А.В. ТИМОШЕНКО, доктор
технических наук, профессор
Д.А. ТАВАЛИНСКИЙ, доктор
технических наук, доцент
М.Т. БАЛДЫЧЕВ, кандидат
технических наук

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ КРИТЕРИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ЕГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

В статье рассматриваются вопросы обоснования рациональной конфигурации системы мониторинга на основе определения нижней границы критерия восстановления целевой функции наблюдаемого сложного объекта с заданной вероятностью. Под критерием восстановления целевой функции понимается объем информации, получаемой системой мониторинга из информационного пространства сложного объекта. Разработана методика построения нижней границы критерия восстановления целевой функции этого объекта с заданной вероятностью. Представлена модель информационного пространства сложного объекта наблюдения в виде графовых структур. Методика предполагает использование разработанной модели информационного пространства для получения множества графовых структур, которые исследуются на предмет сохранения ими связности в рамках теории перколяции. Результаты машинного эксперимента по выявлению перколяционных характеристик исследуемых графовых структур позволили сформулировать требования к нижней границе объема получаемой информации, необходимого для выявления целевой функции наблюдаемого сложного объекта с заданной вероятностью как для условий априорной неопределенности, так и для некоторых частных случаев.

Ключевые слова: информационное пространство; перколяционный анализ; граф.

Введение

Анализ функционирования систем мониторинга в условиях неопределенности динамики помехово-целевой обстановки показывает, что для таких процессов характерны следующие свойства: большое количество слабо формализуемых и зачастую противоречивых целей функционирования с одновременной их изменчивостью (ситуативностью) во времени; конфликтный и многоаспектный характер функциони-

рования при значительном влиянии человеческого фактора; преимущественно понятийный и противоречивый характер исходных описаний условий функционирования и возможных ограничений. Одним из путей снижения влияния данных факторов на работу системы мониторинга является внедрение контура проактивного управления, направленного на выбор и применение превентивных мер на основе прогнозирования характера начала и особенностей развития конфликта. Немаловажным элементом проактивного управления является гибкое распределение ресурсов, предусматривающее выбор способа применения, объем и интенсивность использования элементов системы и многих других параметров, максимизирующих эффективность ее работы [1].

В рамках исследования целью системы мониторинга является заблаговременное выявление целевой функции сложного объекта через анализ его информационного пространства. Под сложным объектом понимается мероприятие, проводимое атакующей стороной антагонистического конфликта, целевой функцией которого может быть как учебно-тренировочная миссия, так и непосредственное силовое воздействие. Сложный объект с текущей целевой функцией характеризуется соответствующим множеством привлекаемых сил и средств, заданной логикой и последовательностью их действий и однозначно определяется специфическим процессом их информационного взаимодействия – информационным пространством (ИП). Дефиниция ИП сложного объекта формулируется как «носитель» структурно-функциональной целостности информации о сложном объекте, проявляющейся через источники информации (связные, радиолокационные и другие радиоэлектронные средства (РЭС)).

Постановка задачи

В работе [2] приведено определение и изложение формализации описания информационного пространства сложного объекта, особенности формально-математических условий сохранения структурно-функциональной целостности информационного пространства по этапам анализа. Так в [2] под последовательностью признаков длиной n , характеризующей состояние и целевую функцию наблюдаемого объекта в информационном пространстве, понимается совокупность $\langle S_i \rangle_n, i = 1(1)N$

признаков источника S , определенных на множестве (алфавите) $A_{\{k\}} = \{a_1, \dots, a_k\}$ объемом k (признаковом пространстве), находящихся в определенных отношениях и связях друг с другом и образующих определенную целостность. Совокупность взаимосвязанных признаков $S_{\langle n \rangle} \in S$ есть форма представления исходного описания наблюдаемого сложного объекта в информационном пространстве. При установлении порядка чередования признаков $S_{\langle n \rangle}$ образуется структура, которая является формой взаимосвязи между элементами информационного пространства, характеризующая состояние сложного объекта. Для анализа состояния сложного объекта системой радиомониторинга в качестве единичных элементов информационного пространства (передаваемой через РЭС информации) принимаются векторы параметров состояния

$$\langle b_i \rangle_m, i = 1(1)m, b_i \in \{0,1\}, \quad (1)$$

и их комбинации

$$\langle B_{\langle l \rangle} \rangle_c = \langle B_{\langle l \rangle 1}, B_{\langle l \rangle 2}, \dots, B_{\langle l \rangle c} \rangle, B_{\langle l \rangle} = \langle b_i \rangle_l, i = 1(1)m. \quad (2)$$

Любое исходное описание наблюдаемого сложного объекта $S_{\langle n \rangle} \in S$ может быть представлено в виде конечной последовательности векторов параметров состояния $\langle b_i \rangle_m$ или их комбинаций $\langle B_{\langle l \rangle} \rangle_c$ и совокупностью преобразований $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots$ над ними.

Принимаемые системой радиомониторинга единичные элементы структуры информационного пространства подвержены искажающим преобразованиям исходных данных, вызванных как структурно-функциональным состоянием системы, так и средой их распространения. Ввиду этого решение задачи идентификации состояния и целевой функции сложного объекта сводится к поиску соответствующей функции обратного преобразования ϕ_u^{-1} такой, что:

$$S_{\langle n \rangle}^* = \phi_u^{-1}(\langle b_i \rangle_m^*), S_{\langle n \rangle}^* \approx S_{\langle n \rangle}. \quad (3)$$

Эффективность поиска правильной функции обратного преобразования зависит от величины меры близости $\langle b_i \rangle_m^*$ с $\langle b_i \rangle_m$, характеризуемой несколькими критериями, одним из которых является объем получаемой информации $|\langle b_i \rangle_m^*|$ (рисунок 1), который в некоторой мере может регулироваться поиском рациональной упорядоченной пары композиции отношений – рациональной конфигурации системы мониторинга [3]:

$$\exists(k_m, p_j): K_{mi} \circ P_{ij} | k_m \in K_{mi}, p_j \in P_{ij} \rightarrow S_{\langle n \rangle}^* \approx S_{\langle n \rangle} \left| |\langle b_i \rangle_m^*| \geq b_{\text{порог.}} \right. \quad (4)$$

где K_{mi} – множество количественных конфигураций k_m системы мониторинга при $i = 1(1)m$; P_{ij} – множество векторов технических параметров элементов системы мониторинга p_j при $j = 1(1)m$.

В выражении (4) $b_{\text{порог}}$ – есть нижняя граница критерия восстановления целевой функции сложного объекта мониторинга $|\langle b_i \rangle_m^*$ с заданной вероятностью $P_{\text{зад}}$.

Поиск нижних оценок обусловлен необходимостью исключения избыточности получаемой системой мониторинга информации. Объем получаемой информации линейно связан с количеством задействованных элементов системы мониторинга, увеличение числа которых приводит: к усложнению структуры системы; снижению устойчивости функционирования; увеличению инертности управления; снижению скорости обрабатываемой информации.

Таким образом, для корректного поиска рациональной упорядоченной пары (k_m, p_j) требуется формулировка требований к нижним оценкам $|\langle b_i \rangle_m^*$. Возможность представления информационного пространства в виде графовой конструкции делает поставленную задачу схожей с задачами, которые решает теория перколяции: при какой доле заблокированных вершин и промежуточных узлов (имитация доступности системы радиомониторинга к единичным элементам структуры информационного пространства $\langle b_i \rangle_m^*$) теряется связность графовой конструкции (возможность нахождения целевой функции сложного объекта наблюдения $S_{\langle n \rangle}^* \approx S_{\langle n \rangle}$).

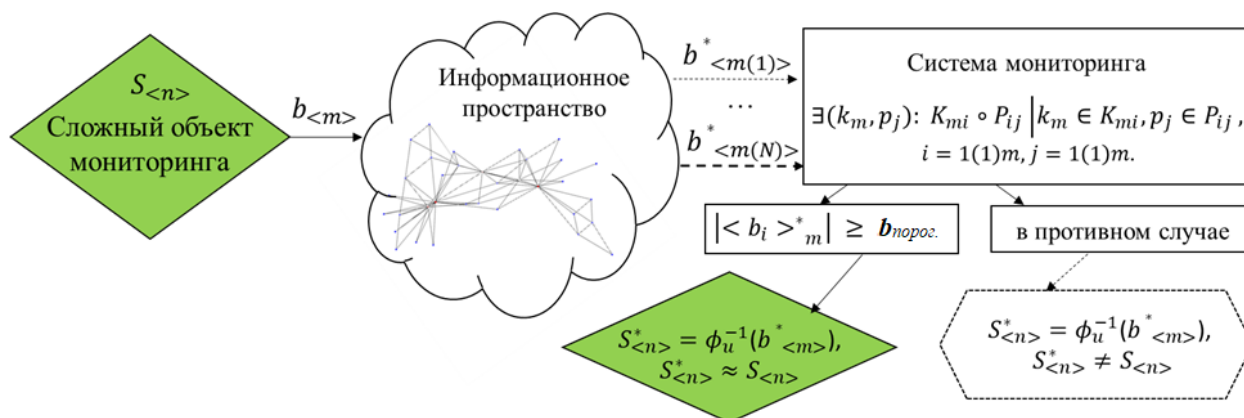


Рисунок 1 – Схематичное представление процесса выявления целевой функции сложного объекта системой мониторинга по средствам анализа его информационного пространства

Таким образом, исследование вопросов представления информационного пространства сложного объекта в виде графовой конструкции и проекции «классических» задач перколяции [4-6] на сформулированную проблему с целью выявления $b_{\text{порог}}$ порождают большой научный и практический интерес.

Цель исследования – разработать методику построения нижней границы критерия восстановления целевой функции сложного объекта мониторинга при заданной вероятности $P_{\text{зад}}$ на основе перколяционного анализа его информационного пространства.

В формализованном виде цель исследования определяется выражением:

$$M: b_{\text{порог}} \rightarrow \begin{cases} P(S_{\langle n \rangle}^* = S_{\langle n \rangle}) \geq P_{\text{зад}}, \text{ при условии } |\langle b_i \rangle_m^*| \geq b_{\text{порог}}; \\ P(S_{\langle n \rangle}^* = S_{\langle n \rangle}) < P_{\text{зад}}, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Модель формирования информационного пространства сложного объекта мониторинга на основе графовых структур

В работе [2] для моделирования процедуры формирования информационного пространства сложного объекта предлагается использовать граф $G(V, E)$, в котором элементы процедуры моделируются вершинами V графа G , а связи между ними – ребрами E . Граф $G(V, E)$ включает:

узлы графа информационного пространства:

$$\langle v_{hp} \rangle_n = \langle v_{h1}, v_{h2}, \dots, v_{hn} \rangle, h = 1(1)k, p = 1(1)n; \quad (6)$$

ребра графа информационного пространства:

$$\langle e_{hp} \rangle_n = \langle e_{h1}, e_{h2}, \dots, e_{hn} \rangle, h = 1(1)k, p = 1(1)n. \quad (7)$$

Любой граф может быть задан как отображение множеств номеров узлов $p = 1(1)n$ и номеров уровней $h = 1(1)k$. Узел v_{hp} , не имеющий исходящих ребер, будем называть вершиной.

При нумерации узлов и уровней выполняются следующие условия (рисунок 2).

1) Номер любого узла всегда больше номера того узла, которому он подчинен (т.е. к которому подходит ребро, идущее от рассматриваемого узла):

$$p^* > p, \forall e_{hp} = (v_{hp}, v_{h^*p^*}), h = 1(1)k, p = 1(1)n. \quad (8)$$

2) Номер уровня подчиненного узла всегда больше номера уровня того узла, которому он подчинен:

$$h^* > h, \forall e_{hp} = (v_{hp}, v_{h^*p^*}), h = 1(1)k, p = 1(1)n. \tag{9}$$

Выполнение условий (8) и (9) устанавливает порядок расположения вершин на уровне, который не стеснен порядком, заданным на вышестоящем уровне.

При нумерации вершин число «1» присваивается всегда параметрам корневого узла, далее непосредственно связанные с корнем узлы нумеруются слева направо. Нижележащие уровни нумеруются сверху вниз, а узлы на них – слева направо.

Получаемый граф, отражающий информационное пространство, представляется как ориентированное дерево, каждый компонент которого также представляет собой ориентированное дерево.

При решении задач идентификации целевой функции сложного объекта мониторинга в условиях априорной неопределенности относительно преобразования $F_{\{\phi\}}$ [2] возникает необходимость формирования элементов в информационном пространстве посредством оператора преобразования $\tilde{F}_{\phi_i}^{-1}$ на множестве возможных решений:

$$\phi^{t_i}(\pi^{(k)}) = \tilde{F}_{\phi_i}^{-1}[\phi^{(t_{i-1})}(\pi^{(k)}), \delta^{(t_i)}(\pi^{(m)})], \tag{10}$$

где F – составная операция над функциями ϕ, δ ;

$\phi^{(t_{i-1})}(\pi^{(k)})$ — функция подчинения в пространстве прямых признаков по отношению к сложному объекту мониторинга;

$\delta^{(t_i)}(\pi^{(m)})$ – функция подчинения в пространстве косвенных признаков по отношению к сложному объекту мониторинга;

$\pi^{(k,m)}$ – путь в признаковом дереве.

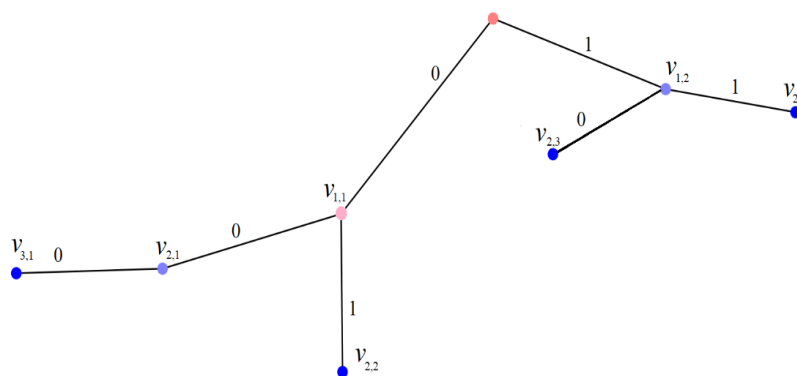


Рисунок 2 – Формирование вершины $v_{3,1}$ признакового дерева при $i = 3$

В этом случае для решения задачи анализа графовой траектории (в рамках модели) возникает необходимость нахождения функции подчинения в пространстве прямых признаков $\tilde{\phi}^{(t_i)}(\pi^{(k)})$, которая с учетом функции подчинения в пространстве косвенных признаков $\tilde{\delta}^{(t_i)}(\pi^{(m)})$ максимизировала полноту восстановления параметров состояния – целевую функцию сложного объекта наблюдения:

$$\tilde{F}_{\phi_i}^{-1} \rightarrow \max_{b_{\langle m \rangle} \in \{b_{\langle m \rangle}\}}. \quad (11)$$

Задача идентификации целевой функции сложного объекта мониторинга при формировании информационного пространства в условиях неопределенности параметров преобразования имеет следующую формулировку. Пусть i -е состояние объекта в информационном пространстве описывается функцией $\tilde{\phi}^{(t_i)}(\pi^{(k)})$. В силу того, что взаимосвязь между путями $(\pi^{(k)})^{(t_i)}$ и $(\pi^{(m)})^{(t_i)}$ признаковых деревьев определяет необходимость вычисления значения графа преобразования $\tilde{\delta}^{(t_i)}(\pi^{(m)})$ в формуле:

$$\tilde{\delta}^{t_{i+1}}(\pi^{(m)}) = \tilde{F}_{\delta_i}^{-1}[\tilde{\phi}^{(t_{i-1})}(\pi^{(k)}), \tilde{\delta}^{(t_i)}(\pi^{(m)})], \quad (12)$$

а графовая траектория может быть представлена как

$$\tilde{\delta}^{t_i}(\pi^{(m)}) \rightarrow \tilde{\delta}^{t_{i+1}}(\pi^{(m)}) \rightarrow \tilde{\delta}^{t_{i+2}}(\pi^{(m)}) \rightarrow \dots \rightarrow \tilde{\delta}^{t_{i+l}}(\pi^{(m)}), l = 0(1)l_{max}. \quad (13)$$

Приведенное выражение, с учетом формулы (10), означает, что функция графа в $(i + 1)$ -м состоянии зависит от управляющего воздействия как $\tilde{F}_{\delta_i}^{-1}$, так и $\tilde{F}_{\phi_i}^{-1}$.

Отображение целевой функции сложного объекта мониторинга через совместное представление информативных признаков $S_{\langle n \rangle}$ и параметров состояния объекта требует соблюдения условия

$$F_{\phi_i}[\phi^{(t_i)}(\pi^{(k)}), \delta^{(t_i)}(\pi^{(m)})] \cong F_{\phi_i}[\phi^{(t_{i+l})}(\pi^{(k)}), \delta^{(t_{i+l})}(\pi^{(m)})], \quad (14)$$

на уровне информационных символов признаков

$$b_i \rightarrow \phi^{(t_i)}(\pi^{(k)}) = \tilde{\phi}^{(t_i)}(\pi^{(k)}) \rightarrow \tilde{b}_i. \quad (15)$$

Взаимосвязь (13) может быть представлена в следующем виде:

$$b_{\langle m \rangle} \rightarrow \varphi(S_{\langle n \rangle}) = \varphi^{-1}(b_{\langle m \rangle}) \rightarrow S_{\langle n \rangle}. \quad (16)$$

В силу наличия обратного преобразования (16) наблюдается корректное отображение пути $\phi^{(t_i)}(\pi^{(k)})$ в признаки, проявляющиеся в ходе действия сложного объекта мониторинга с соответствующим алфавитом, что определяет справедливость равенства (12).

Таким образом, исследование получаемых графовых структур на предмет сохранения ими связности при различной мощности множества $b_{\langle m \rangle}$ с целью построения нижней границы $b_{\text{порог}}$ является математически обоснованным и справедливым для любого $S_{\langle n \rangle}$.

Построение нижней границы $b_{\text{порог}}$ на основе перколяционного анализа графовых структур информационного пространства сложного объекта

Построение нижней границы $b_{\text{порог}}$ аналитическим методом не представляется возможным из-за высокой вариативности видов сложных объектов и их целевых функций, в силу этого для оценивания данной величины рационально использовать статистические исследования [7-9].

Применяя представленные в модели аналитические выражения (6)-(16), сформируем множество графовых структур (рисунок 3), с одной стороны, имеющих фиксированные функциональные взаимосвязи, с другой, имеющих стохастическую составляющую при распределении степеней узлов, что позволяет симитировать допустимые вариации информационного пространства.

Пусть производящая функция вероятности распределения степеней узлов имеет вид:

$$F_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k q_k x^k, \quad (17)$$

где p_k – вероятность того, что случайно выбранный узел имеет степень k ; q_k – вероятность того, что к узлу со степенью k имеется доступ.

Обозначим общую долю доступных узлов – q . Тогда $F_0(1) = q$. При случайно выбранной связи достигнутый узел имеет степень распределения kp_k . Уравнение (17) для такого узла имеет вид:

$$F_1(x) = \frac{\sum_k kp_k q_k x^{k-1}}{\sum_k kp_k} = \frac{F_0(x)}{z}, \quad (18)$$

где z – средняя степень узла.

Пусть $P_1(x)$ – производящая функция, характеризующая вероятность того, что один конец случайно выбранной связи приводит к корню признакового дерева со степенью k с вероятностью $F_1(1)$, удовлетворяет условиям самоорганизации и формализуется выражением:

$$P_1(x) = 1 - F_1(1) + xF_1[P_1(x)]. \quad (19)$$

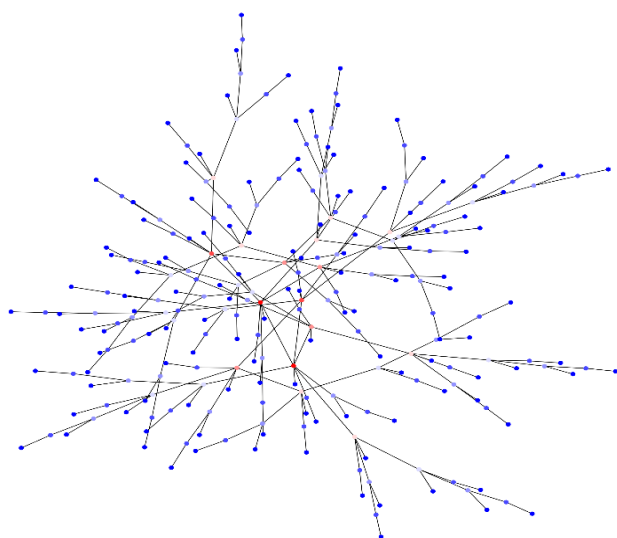
Для перколяционной связи с равномерным распределением получена вероятность:

$$P_0(x) = x [P_1(x)], \tag{20}$$

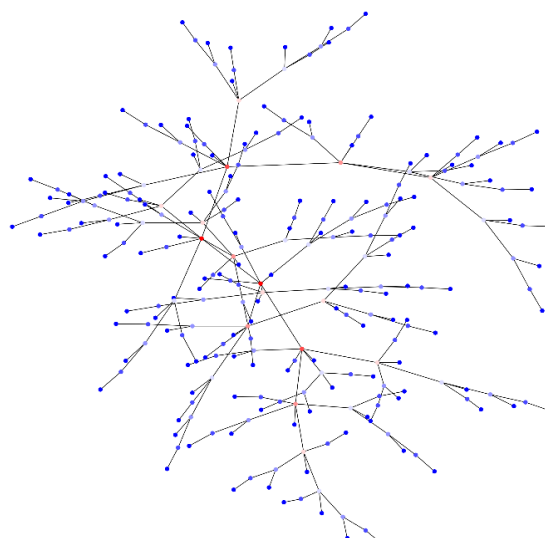
где $P_1(x)$ находится по формуле:

$$P_1(x) = 1 - q + qxG_1[P_1(x)], \tag{21}$$

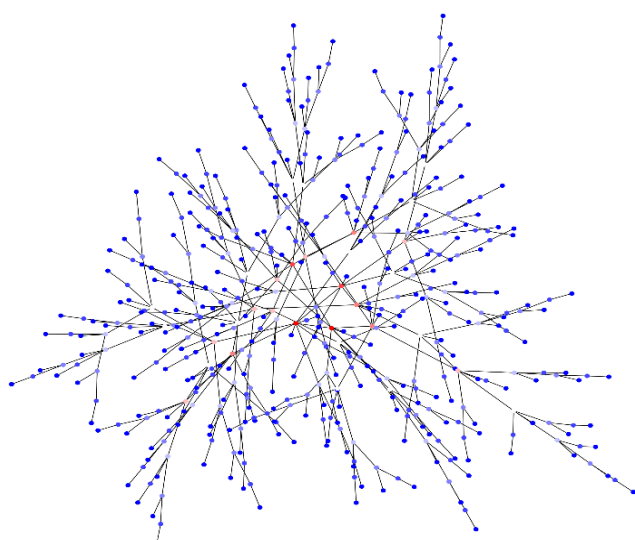
где $G_1(x) = \frac{G_0(x)}{z}$ – производящая функция степени узла.



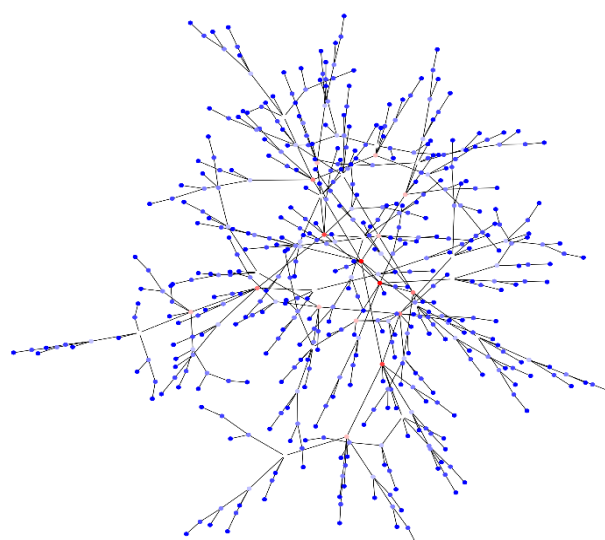
а) сложный объект №1 в i -м состоянии



б) сложный объект №1 в $(i + 1)$ -м состоянии



в) сложный объект №2 в i -м состоянии



г) сложный объект №2 в $(i + 1)$ -м состоянии

Рисунок 3 – Графовые структуры информационных пространств двух различных сложных объектов с различными целевыми функциями

$P_0(x)$ находится по формуле:

$$P_0(x) = 1 - q + qxG_0[P_1(x)], \quad (22)$$

где $G_0(x) = \sum_k p_k x^k$.

Для определения средней длины пути признакового дерева до порога перколяции используется выражение:

$$P'_0(1) = q + qG'_0(1)P'_1(1) = q \left[1 + \frac{qG'_0(1)}{1 - qG'_1(1)} \right]. \quad (23)$$

Выражение расходится при $1 - qG'_1(1) = 0$. Таким образом, порог связности графовой конструкции имеет вид:

$$b_{\text{порог.}} = \frac{1}{G'_1(1)}. \quad (24)$$

Совокупность уравнений (17)–(24) позволяет определить значение порога перколяции для древовидных графовых структур (рисунков 4), отражающих информационное пространство двух различных сложных объектов в i -х состояниях.

Результаты численного моделирования определения порогового значения сохранения связности (перколяции) графовой конструкции для различного среднего числа связей на один узел (что эквивалентно различным состояниям информационного пространства сложного объекта и доступности средств мониторинга к источникам информации) представлены на рисунке 4 и в таблице 1.

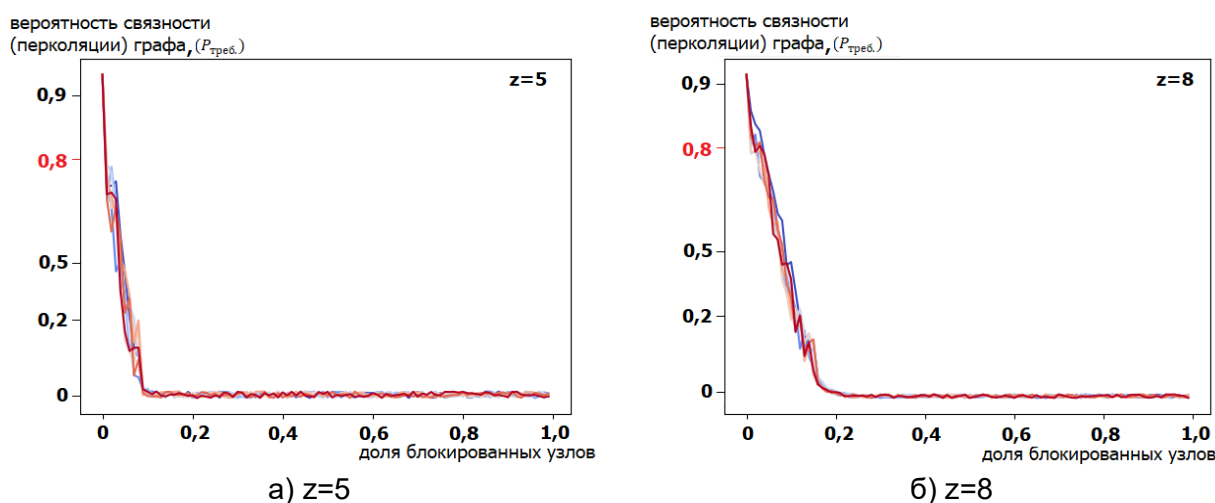


Рисунок 4 – Зависимость вероятности связности графа от доли недоступных для мониторинга узлов для различных значений z

Таблица 1

Число связей на один узел	Среднее число связей на один узел, без учета висящих вершин	Доля заблокированных узлов, при которой теряется связность графа (порог перколяции)
от 3 до 7	5	0,125 (0,875)
от 4 до 12	8	0,195 (0,805)
от 7 до 15	11	0,210 (0,790)

Получаемые графовые конструкции имеют достаточно высокий порог перколяции, связность графа, в среднем, теряется в районе 15% заблокированных узлов. Проецируя полученные результаты на цель исследования, для различных сложных объектов при фиксированной вероятности ($P_{\text{треб.}} = 0,8$) $b_{\text{порог.}}$ варьируется в пределах 20%, в зависимости от средней степени узлов.

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие утверждения:

1. При фиксированной вероятности правильного восстановления целевой функции значение $b_{\text{порог.}}$ варьируется в зависимости от типа сложного объекта в пределах 20 %.

2. Выявление целевой функции сложного объекта, в условиях априорной неопределенности его типа, с вероятностью ($P_{\text{треб.}} = 0,8$) обеспечивается при $b_{\text{порог.}} = 0,87$.

Выводы

В статье исследованы вопросы формализации информационного пространства сложного объекта наблюдения в виде графовых структур. На основе положений теории информации, изучающей методы представления данных, представлена модель формирования информационного пространства сложного объекта наблюдения в виде графовых структур. Проведена математическая обоснованность представленной модели.

Разработана методика построения нижней границы критерия восстановления целевой функции $b_{\text{порог.}}$ наблюдаемого объекта на основе перколяционного анализа его информационного пространства.

Проведенный в соответствии с разработанной методикой машинный эксперимент позволил сформулировать следующие утверждения:

при фиксированной вероятности правильного выявления целевой функции значение $b_{\text{порог.}}$ варьируется в зависимости от типа сложного объекта в пределах 20%;

выявление целевой функции сложного объекта с вероятностью $P_{\text{треб.}} = 0,8$, в условиях априорной неопределенности его типа обеспечивается при $b_{\text{порог.}} = 0,87$.

Список использованных источников

1. Малышев В.А., Прокофьев В.С. Нечеткие алгоритмы планирования и модели взвешенного прогноза распределения ресурсов системы управления специального назначения // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2008. №3. – С. 49-52.
2. Тавалинский Д.А., Тимошенко А.В., Шайдулин З.Ф., Захаров К.Н. Аналитическое описание целостного информационного пространства объекта на основе графовых структур // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. №20. – С. 301-313.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд. М.: Радио и связь, 1989. – 653 с.
4. Zhukov D., Khvatova T., Lesko S., Zaltzman A. Managing social networks: Applying the percolation theory methodology to understand individuals' attitudes and moods // Technological Forecasting and Social Change. 2018. Vol.129. – P. 297-307.
5. Okorafor E., Lu M. Percolation routing in a three-dimensional multicomputer network topology using optical interconnection // Journal of Optical Networking. 2005. Vol.4. Iss.3. – P.157-175.
6. Ли П. Архитектура интернета вещей. М.: ДМК Пресс, 2019. – 454 с.
7. Bucchi M., Grez A., Riveros C., Ugarte M. Foundations of Complex Event Processing // arXiv by Cornell Tech. 2018. 30 Aug. – arXiv:1709.05369v2.
8. Zhukov D., Lesko S. The percolation theory based analysis of data transmission reliability via data communication networks with random structure and kinetics of nodes blocking by viruses // ICNS 2015. Summ. of The Eleventh International Conference on Networking and Services. Rome, Italy, 2015 (24-29 May). IARIA, 2015. – P. 24-30.
9. Айзерман М.А., Гусев Л.А., Петров С.В., Смирнова И.М., Тененбаум Л.А. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики) // Исследования по теории структур: сб. науч. тр. Ин-та проблем управления АН СССР. М.: Наука, 1988. – С. 5-76.