

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕЧЕТКОГО ГРАФА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Е.Р. Зяблова (*zero32f@mail.ru*)

А.О. Ермаков (*alee@sfedu.ru*)

Э.С. Шевкетова (*shevketova@sfedu.ru*)

Южный федеральный университет, Таганрог

В работе рассматриваются особенности реализации модифицированного алгоритма разделения нечеткого графа с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями. Обосновано применение такого графа для моделирования сложных технических систем (СТС) с разнотипными информационными потоками. Преимуществом модифицированного алгоритма разделения является сохранение вычислительной сложности оригинального алгоритма с учетом возможности обработки нечеткого графа с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями. Отличительной особенностью реализованного алгоритма является возможность разделения графа на пропорциональные подграфы (по количеству вершин). Описаны подходы формирования зон влияния объектов системы с использованием алгоритма разделения и алгоритма вычисления метрик графа. В качестве примера СТС рассмотрена система охраны протяженного периметра, для которой сформированы зоны влияния агентов в зависимости от метрик подграфов.

Ключевые слова: нечеткий граф, разнотипные вершины, разнотипные множественные связи, разделение графа, система охраны, программная реализация.

Введение

В работе [Цветков, 2017] сложные технические системы (СТС) определены как «информационно-технические системы» и «системы, поведение которых сложно моделировать из-за сложных зависимостей между их частями или из-за сложных взаимодействий между данной системой и окружающей средой», и показано, что они «ближе относятся к области

«больших данных», «больших графов» и «больших сетей». В данной работе в качестве СТС рассматривается группа систем с разнотипными информационными потоками между объектами, например потоками видео- / аудиоинформации, управляющих сигналов и др.

Решению задачи моделирования СТС, в том числе для обеспечения безопасности объектов в системах охраны периметров большой протяженности посвящены множество работ [Особенности организаций систем безопасности объектов с большой протяженностью периметра, 2020], [Збирко, 2021], в том числе актуальной остается задача поиска эффективных подходов для моделирования взаимодействия объектов таких систем на основе графов [Лазарев, 2020] и их обобщений, например, гиперграфов, метаграфов [Меньших и др., 2021], и их программная реализация.

Так, например, в работе [Лазарев, 2020] для оценки эффективности комплекса технических средств системы охраны используется ориентированный граф, заданный множествами вершин и дуг (ориентированных связей). Здесь в качестве вершин представлены показатели интеллектуальных элементов (датчиков, линий связи и др.), а дуги характеризуют иерархические связи элементов комплекса технических средств.

В статье [Меньших и др., 2021] предложено использование ориентированного метаграфа для построения структурно-параметрической модели системы обеспечения безопасности. Здесь ориентированный метаграф задан конечными множествами вершин, метавершин, дуг и соответствий между дугами и вершинами и метавершинами. В качестве метавершин могут выступать множества объектов защиты, множества угроз безопасности, а дуги между метавершинами отражают различные типы взаимоотношений, например «множество объектов защиты находятся в конфликте с множеством угроз безопасности» и др. Структурно-параметрическая модель системы строится на основе метаграфа с учетом вычисленных весов вершин и дуг, соответствующих степеням защищенности и важности объектов. Целевой функцией является максимизация степени защищенности системы.

Подходы, изложенные в работах [Лазарев, 2020] и [Меньших и др., 2021], позволяют отобразить систему в виде графовой или метаграфовой модели, но при этом не используют возможности теории графов в части алгоритмических средств. К тому же в метаграфовой модели для представления отношений различного типа используются однотипные дуги с весовыми коэффициентами.

В то же время развитие теории графов привело к появлению моделей, учитывающих разнотипные связи в графах [Boccaletti et al., 2014]. При помощи таких моделей можно представить разнотипные отношения в системе.

Однако, графы, моделирующие СТС, могут быть достаточно большими, что влечет рост временных затрат на вычисления при помощи алгоритмов [Hamilton, 2020]. Эта проблема частично решена в моделях на основе нечетких графов с множественными и разнотипными связями [Еремеев и др., 2021].

1. Постановка задачи

В данной работе будем рассматривать сложную техническую систему на примере системы охраны протяженного периметра. Такая система содержит ряд разнотипных объектов: ОО – мобильные и/или стационарные объекты охраны (люди, здания, склады и др.), ОПО – опорные точки объектов охраны (вышки и т.д.); агенты – роботизированные устройства, ЛППР – лицо, принимающее решения (компьютер), а также ПН – потенциальные нарушители (люди, роботы и другие объекты, проникающие извне, которые представляют возможную угрозу для безопасности охраняемого периметра). Между объектами существуют разнотипные отношения, например «управлять движением», «удаленность объектов», «наблюдать» и др.

Зона влияния агента может распространяться на некоторые объекты системы, в том числе на объекты охраны, их опорные точки и потенциальных нарушителей. Информация от агентов может поступать на ЛППР через различные беспроводные каналы связи, например, через Wi-fi, Bluetooth или низкочастотный радиоканал, в зависимости от степени удаленности агентов и ЛППР.

К основным задачам ЛППР относятся следующие задачи:

- моделирование системы охраны при помощи подходящей модели, например нечеткого графа с множественными и разнотипными связями [Еремеев и др., 2021] или его модификации с учетом разнотипности вершин, как предложено в работе [Зяблова, 2024,6];
- обмен видеоинформационными и управляющими сигналами с агентами с целью формирования их зон влияния.

Для формирования зон влияния объектов системы предложено использование алгоритма поиска кратчайших путей и алгоритма разделения графа [Зяблова, 2024,в]. После разделения графа в полученных подграфах вычисляются метрики (радиус, диаметр) и сравниваются с метриками конкретных моделей агентов.

Графовая модель должна меняться в режиме реального времени в зависимости от текущего состояния объектов системы. Для реализации такой модели была разработана среда моделирования на основе нечеткого графа с множественными и разнотипными связями [Мунтян, 2021]. Данная среда включала следующие возможности:

- разработка графовой модели с учетом множественных и разнотипных связей вручную;

- использование модифицированного алгоритма поиска кратчайших путей Форда-Беллмана [Зяблова, 2024,в];
- использование модифицированного алгоритма разделения графа [Мунтян, 2023] на основе алгоритма свертки вершин.

Однако требования динамичности к среде моделирования потребовали обновления программного обеспечения (ПО). Коллективом разработчиков принято решение об использовании клиент-серверной архитектуры для разрабатываемого ПО и использовании языка разработки Python. В настоящее время разработана структура программной системы моделирования взаимодействия объектов СТС [Зяблова, 2024,а], определены ее функциональные возможности и реализован ряд модулей, включая модуль динамической визуализации графовой модели [Зяблова и др., 2024].

Принято решение об использовании модифицированной модели на основе нечетких графов с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями, подробно описанной в работе [Зяблова, 2024,б].

Данная работа посвящена программной реализации алгоритма разделения такого графа.

2. Описание нечеткого графа с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями

Формально такой граф задан в виде

$$G = (Gv, Ge), \quad (1)$$

где $Gv = \{gv_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ – нечеткое конечное множество разнотипных вершин (gv – *graph vertex*), $Ge = \{ge_l \mid l = 1, 2, \dots, m\}$ – нечеткое конечное множество связей (ge – *graph edge*).

Множество $Gv = \{Gv(tpv_k)\}$ позволяет задать группы разнотипных вершин. К атрибутам вершины относятся ее идентификатор, вес и тип. Применительно к системе охраны, вершины графа G могут задавать различные группы объектов системы, например объекты охраны, опорные точки объектов охраны, агенты, ЛППР и потенциальные нарушители.

Множество связей графа G определяется следующим образом:

$$Ge = \{Ge(o), Ge(tp_k), Ge(v_e)\}, \quad (2)$$

где $Ge(o)$ – подмножество однотипных связей, $Ge(tp_k)$ – подмножество разнотипных связей и $Ge(v_e)$ – подмножество множественных связей в виде вектора, позволяющих объединить t разнотипных связей в виде кортежа $\bar{v} = \langle v_1, v_2, \dots, v_t \rangle$. Существующие отношения между объектами системы в графовой модели представлены разнотипными связями (отношения «управлять движением», «удаленность объектов», «наблюдать» и др.) и множественными связями в виде вектора, например отношение «передача информации по различным каналам», в том числе: v_1 – «Wi-fi», v_2 – «Bluetooth», v_3 – «низкочастотный радиоканал».

Весу связи в нечетком графе G может придаваться смысл меры достоверности или степени принадлежности нечеткому множеству. Степени принадлежности могут быть постоянными, либо вычисляемыми посредством фаззификации [Ярушкина, 2004]. В таком графе веса вершин и связей ($\eta_i \in [0,1]$ и $\mu \in [0,1]$) можно интерпретировать в зависимости от используемой смысловой нагрузки, например вес разнотипной связи, задающей отношение «удаленность объектов», соответствует степени удаленности объектов системы. Веса вершин определенного типа (например, задающих агентов системы), могут соответствовать значениям диаметров обзора агентов с учетом принятой шкалы.

Для оценки значений показателей весов вершин и связей графа (1) предложено вербальное описание показателей и соответствующий им диапазон численных значений весов вершин и связей графа: 0 – показатель отсутствует; [0,01; 0,40] – слабый показатель; [0,41; 0,70] – умеренный показатель; [0,71; 1,00] – сильный показатель.

Преимущества данной модели отмечаются в работе [Зяблова, 2024,б] и заключаются в возможности представить разнотипные элементы системы и их отношения и одновременно снизить время анализа данных в системах с разнотипными информационными потоками за счет использования множественных связей в виде вектора, которые позволяют объединить ряд разнотипных связей. Например, в работе [Зяблова, 2024,а] показано уменьшение временных затрат на формирование матрицы расстояний для графов размерностью 300 – 1000 вершин не менее, чем в 1,5 раза по сравнению с известными моделями [Voccaletti et al., 2014], допускающими только разнотипные связи.

Это подтверждает эффективность и предпочтительность использования на практике нечетких графов с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями для моделирования взаимодействия объектов сложных систем.

3. Реализация модифицированного алгоритма пропорционального разделения нечеткого графа с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями

Модифицированный алгоритм пропорционального разделения нечеткого графа с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями (далее – алгоритм разделения графа) представлен и подробно описан в работе [Мунтян, 2023], где отмечены его преимущества. Данный алгоритм позволяет обрабатывать нечеткий граф с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями, сохраняет вычислительную сложность оригинального алгоритма и позволяет уменьшить время разделения графа по сравнению с алгоритмами, использующими матрицы

смежности или инцидентности и последовательный перебор вершин в зависимости от полноты графа до 20% [Сергеев и др., 2018]. Модуль, реализующий данный алгоритм, является составной частью программной системы моделирования [Зяблова, 2024,а]. Данный алгоритм позволяет разделить граф на подграфы с заданными пропорциями подмножеств вершин.

Хранение графовой структуры осуществляется в формате JSON. Связи графа определяются парами идентификаторов начальной и конечной вершин с указанием веса. Такой подход к структурированию данных обеспечивает простоту интеграции алгоритма с различными информационными системами и специализированными графовыми базами данных, включая, Neo4j [Еремеев и др., 2022] и др.

Основная логика алгоритма реализована в классе ZonePartitioner. Метод partition отвечает за процесс распределения вершин по подграфам, начиная с выбранных исходных вершин и итерационно присоединяя соседние элементы с учётом установленных соотношений.

Алгоритм разделения графа строится на последовательности ключевых этапов:

- 1) **фильтрация входных данных** (на этом этапе осуществляется отбор вершин и рёбер по заданным критериям, например, по типу вершины и/или связи, по значению веса вершины и/или связи. Это позволяет убрать из рассмотрения несущественные элементы и сфокусировать вычисления на релевантных компонентах графа);
- 2) определения количества частей разделения на подграфы с помощью ввода в консоль необходимых значений;
- 3) выбор исходных вершин (для формирования подграфов определяется набор исходных вершин, которые могут находиться как в центре, так и на периферии графа. В прикладных задачах, таких как охрана периметра, в качестве исходных вершин графа могут выступать агенты системы;
- 4) возможность выбора пропорций разделения графа на подграфы: равные или пропорциональные части (подмножества вершин);
- 5) **параллельное выполнение процедуры свёртки** (основная суть алгоритма заключается в итеративном присоединении соседних вершин, начиная с выбранных исходных вершин. Процесс проводится одновременно для всех подграфов, что обеспечивает равномерное и эффективное распределение вершин между выделенными подграфами. Важной особенностью является независимость метода от типа связей).

Предварительно представляется графовая модель системы охраны, в виде графа $G_1 = (Gv_1, Ge_1)$. Множество вершин $Gv_1 = \{gv_i \mid i = 1, 2, \dots, 20\}$. Соответствие вершин графа G_1 объектам системы отражено в табл. 1.

Здесь веса вершин типов tpv_1 и tpv_2 назначаются экспертом и соответствуют степеням значимости объектов, а веса вершин типа tpv_3 определяют посредством фаззификации в соответствии с техническими характеристиками агентов.

Таблица 1

Соответствие вершин графа G_1 объектам системы

Вершины графа	Типы вершин	Веса вершин	Объекты системы
gv_1-gv_{16}	tpv_1	по 0,5	объекты охраны $OO_1 - OO_{16}$
gv_{17}	tpv_2	1,0	ЛПР
$gv_{18}-gv_{21}$	tpv_3	по 0,9	агенты $A_1 - A_4$

Примем шкалу соответствий реального расстояния в системе и веса вершины и/или связи графа. Будем полагать, что расстояние в 2 км соответствует весовому коэффициенту с числовым значением «1». В соответствии с принятой шкалой выбраны агенты $A - A_4$ с диаметром обзора 1,8 км (веса вершин $gv_{18}-gv_{21}$ принимают значение «0,9»).

Множество Ge_1 содержит множественные и разнотипные связи:

- связи ge_1-ge_{20} (тип tp_1), которые соответствуют отношению «удаленность», а веса этих связей – степени удаленности объектов друг от друга;
- связи $ge_{21}-ge_{40}$ (тип tp_2) соответствуют отношению «наблюдать»;
- множественные связи в виде вектора $ge_{41}-ge_{44}$ представляют отношение «Передача информации по каналам». Информация может передаваться по одному из трех каналов в зависимости от степени удаленности агентов и ЛПР: Wi-Fi; Bluetooth; низкочастотный радиоканал.

На этапе 1 выполняется фильтрация множеств вершин и связей графа по их типу. Для данного графа будут оставлены связи типа tp_1 и вершины типа tpv_1 . В результате фильтрации, сформирован граф G_2 (рис. 1).

На этапе 2 определяется количество частей графа, которое зависит от количества агентов в системе. С учетом количества агентов графовая модель (рис.1) будет разделена на 4 части.

На этапе 3 происходит формирование подмножества исходных вершин графа G_2 : $OrVertex = \{gv_3, gv_7, gv_{10}, gv_{12}\}$.

На этапе 4 осуществляется выбор пропорций для деления на подграфы, пусть для описанной выше модели графа пропорции для каждой зоны будут равны 0,25.

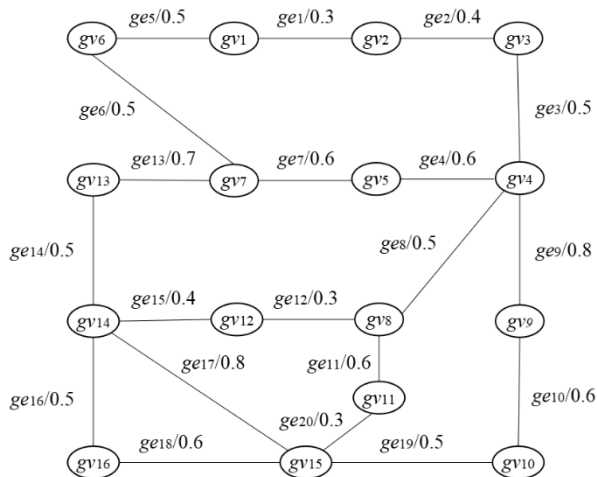


Рис. 1. Изображение графа G_2

На этапе 5 реализуется процедура свёртки и формирование подграфов $G_{2.1} - G_{2.4}$, где $G_{2.1} = \{gv_1, gv_2, gv_3, gv_4\}$, $G_{2.2} = \{gv_5, gv_6, gv_7, gv_{13}\}$, $G_{2.3} = \{gv_9, gv_{10}, gv_{15}, gv_{16}\}$, $G_{2.4} = \{gv_8, gv_{11}, gv_{12}, gv_{14}\}$.

На этом работа алгоритма разделения графа завершается. На рис. 2 приведены результаты работы алгоритма, здесь подграфы выделены разными цветами.

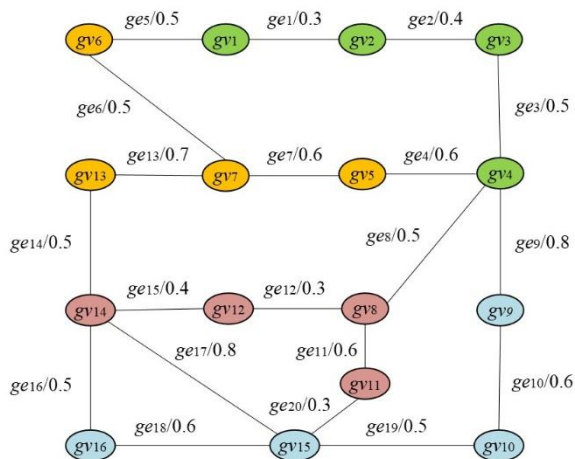


Рис. 2. Результаты работы алгоритма разделения графа G_2 на части

Сформированы зоны влияния объектов системы охраны: $A = \{OO_1, OO_2, OO_3, OO_4\}$; $A_2 = \{OO_5, OO_6, OO_7, OO_{13}\}$; $A_3 = \{OO_9, OO_{10}, OO_{15}, OO_{16}\}$; $A_4 = \{OO_8, OO_{11}, OO_{12}, OO_{14}\}$.

Для каждого подграфа при помощи модифицированного алгоритма поиска кратчайших путей [Зяблова, 2024,в] вычисляются радиус r и диаметр d . Полученные значения ($d_{2,1} = 0.6, r_{2,1} = 0.35$; $d_{2,2} = 0.65, r_{2,2} = 0.35$; $d_{2,3} = 0.85, r_{2,3} = 0.55$; $d_{2,4} = 0.65, r_{2,4} = 0.35$) позволяют представить метрики зон влияния агентов $A_1 - A_4$.

Полученные параметры служат основой для выбора моделей агентов с заданными техническими характеристиками, что обеспечивает надёжное и эффективное видеонаблюдение за областью охраняемого периметра. Так, для обеспечения видеонаблюдения за областью охраняемого периметра достаточно четыре агента с диаметром обзора не менее 1,7 км.

Заключение

В работе рассмотрены особенности и пример применения модифицированного алгоритма пропорционального разделения нечеткого графа с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями для формирования зон влияния объектов СТС. Данный алгоритм позволяет обрабатывать нечеткий граф с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями и сохраняет вычислительную сложность оригинального алгоритма. Особенностью алгоритма разделения является возможность фильтрации вершин и связей графа, а также разделения графа на подграфы в заданных пропорциях по подмножествам вершин.

Список литературы

- [Особенности организаций систем безопасности объектов с большой протяженностью периметра, 2020]. Гречаный С.А., Герасименко Е.С., Романов М.С., Таравков М.В. Особенности организаций систем безопасности объектов с большой протяженностью периметра // Охрана, безопасность, связь. – 2020. – № 5-1. – С. 54-58.
- [Еремеев и др., 2021] Еремеев А.П., Мунтян Е.Р. Разработка онтологии на основе графов с множественными и разнотипными связями // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2021. – № 3. – С. 3-18. – DOI 10.14357/20718594210301.
- [Еремеев и др., 2022] Еремеев А.П., Панявин Н.А. Унификация модели представления данных и преобразование форматов на основе нереляционной СУБД Neo4j // Программные продукты и системы. – 2022. – Т. 35, № 4. – С. 549-556. – DOI: 10.15827/0236-235X.140.549-556.
- [Збирко, 2021] Збирко А.И. Исследование возможностей беспилотных летательных аппаратов при охране объектов большой протяженности // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2021. – № 4. – С. 32.
- [Зяблова, 2024,а] Зяблова Е.Р. Программная система моделирования взаимодействия объектов системы охраны // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии «IS&IT'24». Т. 2. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2024. – С. 355-359.

- [Зяблова, 2024,б] Зяблова Е.Р. Использование графовых подходов для решения задачи прогнозирования в области формирования карьерных траекторий // Труды XII Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». В 2-х т. Т. 1. – Смоленск: Универсум, 2024. – С. 150-158.
- [Зяблова, 2024,в] Зяблова Е.Р. Модификация алгоритма поиска кратчайших путей ГН-графа для анализа сложных технических систем // Программные продукты и системы. – 2024. – Т. 37, № 3. – С. 354-363. – DOI: 10.15827/0236-235X.147.354-363.
- [Зяблова и др., 2024] Зяблова Е.Р., Боваев А.Б., Литвиненко В.Н. Особенности разработки программного модуля динамической визуализации графовой модели // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. науч. тр. XII Всерос. научн. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2024. – С. 193-196.
- [Лазарев, 2020] Лазарев И.В. Применение графовой модели для оценки эффективности комплекса технических средств систем охраны // Охрана, безопасность, связь. – 2020. – № 5-2. – С. 151-153.
- [Меньших и др., 2021] Меньших В.В., Чиркова Н.Е. Построение структурно-параметрической модели гетерогенной системы обеспечения безопасности с использованием теории метаграфов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2021. – № 1. – С. 54-61.
- [Мунтян, 2021] Мунтян Е.Р. Использование нечетких ГН-моделей для представления сложных технических систем // Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 55-60. – DOI:1034219/2078-8320-2021-12-3-55-60.
- [Мунтян, 2023] Мунтян Е.Р. Разработка алгоритма пропорционального разделения ГН-графа для формирования зон влияния объектов в сложных технических системах // Программные продукты и системы. – 2023. – Т. 36, № 3. – С. 378-387. – DOI: 10.15827/0236-235X.143.378-387.
- [Цветков, 2017] Цветков В.Я. Сложные технические системы // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – № 3(20). – С. 86-91.
- [Сергеев и др., 2018] Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р. Применение алгоритма свертки для разделения графа на пропорциональные подграфы // Вестник УГАТУ. – 2018. – Т. 22, № 1(79). – С. 121-130.
- [Ярушкина, 2004] Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
- [Boccalettia et al., 2014] Boccalettia S., Bianconic G., Criadod R., del Geniof C.I., Gómez-Gardeñesi J., Romanced M., Sendiña-Nadalj I., Wangk Z., Zaninm M. The structure and dynamics of multilayer networks. Preprint submitted to Physics Reports, 2014. – 157 p.
- [Hamilton, 2020] Hamilton W.L. Graph Representation Learning // Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning. – 2020. – Vol. 14. No. 3. – P. 1-159.
- [Eremeev, 2022] Eremeev A.P., Muntyan E.R. Developing an ontology on the basis of graphs with multiple and heterotypic connections // Scientific and Technical Information Processing. – 2022. – Vol. 49, No. 6. – P. 427-438.