

УДК 004.45

Методы и технологии конструирования эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований

Касьянов В.Н. (Институт систем информатики СО РАН),

Касьянова Е.В. (Институт систем информатики СО РАН)

В Институте систем информатики СО РАН с 2021 года выполняется проект «Методы и технологии конструирования эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований» коллективом сотрудников лабораторий «Конструирования и оптимизации программ» и «Системное программирование» под научным руководством д.ф.-м.н., профессора В. Н. Касьянова. Ответственными исполнителями проекта являются к.ф.-м.н., доцент Е. В. Касьянова и к.т.н. В. И. Шелехов. В данной статье кратко представлены те результаты выполнения первого этапа данного проекта, которые были получены сотрудниками лаборатории «Конструирования и оптимизации программ».

Ключевые слова: визуальная обработка, конструирование программ, оптимизирующая трансляция, параллельное программирование, предикатное программирование, программное обеспечение, теоретико-графовые методы, трансформационное программирование, функциональное программирование, языки и системы программирования.

1. Введение

Тенденция развития программирования состоит в том, что все более разнообразные процессы обработки программ и данных и все в большей степени поддерживаются машиной. Большинство из этих процессов обработки программ и данных реализуется в существующих инструментах как текстовые или языковые, но является семантическими. В них, как правило, требуется сохранение некоторого инварианта, определенным образом связанного с семантикой обрабатываемых объектов (например, трансляция и другие функционально эквивалентные преобразования программ сохраняют функцию, реализуемую программой). Поэтому без всестороннего изучения и глубокого использования в инструментальных системах семантических преобразований нельзя достичь ни надежного, ни эффективного

эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований решения задач автоматизации программирования, перейти от кустарного производства программ к технологии и массовому производству.

Трансформационный подход трактует программирование как систематическое применение фундаментальных процессов семантической обработки программ, сохраняющих при преобразовании программы определенный ее семантический инвариант и образующих в совокупности «сумму технологий». Трансформационные методы используются в качестве основного средства для достижения эффективности при автоматизации программирования методами трансляции, особенно в связи с появлением ЭВМ новых архитектур. Они являются перспективным направлением в создании новых, более мощных средств автоматизации конструирования эффективных и надежных программ.

Работы по теоретическому обоснованию трансформационного подхода к разработке программного обеспечения активно развиваются во всем мире. Вместе с тем перед исследователями все еще стоит задача разработать «алгебру программ», позволяющую манипулировать программными фрагментами в рамках формального исчисления программ с целью автоматизации конструирования эффективных и надежных программ для перспективных ЭВМ. Эта очень заманчивая цель вряд ли будет достигнута в ближайшем будущем ввиду разнообразия используемых языков программирования и спецификаций, а также архитектур ЭВМ. Однако если алгоритмический уровень для начальной спецификации зафиксирован, то разработка методов и средств для преобразования данной программы в корректную и эффективную версию для компьютеров с различными архитектурами может считаться реалистичной задачей. В этом направлении учеными новосибирской школы программирования, основанной и долгое время руководимой академиком А. П. Ершовым, были получены значительные результаты, образующие хороший фундамент для активного и целенаправленного продолжения работ [1–3, 10–14].

С 2021 в Институте систем информатики СО РАН выполняется проект «Методы и технологии конструирования эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований» коллективом сотрудников лабораторий «Конструирования и оптимизации программ» и «Системное программирование» под научным руководством д.ф.-м.н., профессора В. Н. Касьянова. Ответственными исполнителями проекта являются к.ф.-м.н., доцент Е. В. Касьянова и к.т.н. В. И. Шелехов.

Цель проекта — повышение эффективности и надежности компьютерного решения прикладных задач за счет совершенствования программного обеспечения перспективных вычислительных систем. Задачей проекта является развитие теории, методов и технологий

оптимизирующей трансляции и конструирования эффективного, надежного, переносимого и адаптивного программного обеспечения для суперкомпьютеров и компьютерных сетей на основе трансформационного и объектно-ориентированных подходов, теоретико-графовых методов, аннотирования программ, функциональных и логических спецификаций, средств специализации и визуальной обработки.

Расширение трансформационного подхода на логические и аннотированные программы и использование теоретико-графовых методов и средств визуализации, развиваемые авторами проекта, позволяют создать единую основу для сочетания различных видов семантической обработки, включая анализ, преобразование и синтез, а также для объединения автоматических и автоматизируемых процессов обработки.

В данной статье кратко представлены те результаты выполнения первого этапа проекта, которые были получены сотрудниками лаборатории «Конструирования и оптимизации программ» [4–9, 15–22]. Оставшаяся часть статьи состоит из трех разделов и заключения. Раздел 2 содержит обзор результатов по развитию методов и технологий конструирования эффективных и надежных параллельных программ на основе функциональных спецификаций и семантических преобразований. В Разделе 3 рассматриваются разработанные теоретико-графовые методы и инструменты для поддержки конструирования эффективных и надежных программ. Разработке методов, алгоритмов и систем для исследования сложных больших данных, систем и процессов через их визуальные представления с использованием атрибутированных иерархических графовых моделей посвящен Раздел 4.

2. Развитие методов и технологии конструирования эффективных и надежных параллельных программ на основе функциональных спецификаций и семантических преобразований

Проведено исследование методов и средств конструирования эффективных и надежных параллельных программ на основе функциональных спецификаций и семантических преобразований.

Разработана программа CPPS, которая формирует начальную версию облачной расширяемой интегрированной визуальной среды поддержки параллельного программирования на языке Cloud Sisal (см. Рис. 1). Разработанный входной язык Cloud Sisal программы CPPS, оставаясь функциональным потоковым языком с неявным параллелизмом,

эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований содержит такие средства написания научных программ, как циклы и массивы. Среда CPPS доступна к использованию через веб-браузер, использует для всех своих компонент единое семантическое представление Cloud Sisal программы в виде графовой модели и ориентирована на расширение средствами разработки, отладки, верификации и исполнения параллельных программ по их функциональным спецификациям на языке Cloud Sisal. Вместе с созданными компилятором и профилировщиком (см. Рис. 2) программа CPPS позволяет пользователю на любом устройстве, имеющем выход в Интернет, разрабатывать и исполнять функциональные программы на языке Cloud Sisal.

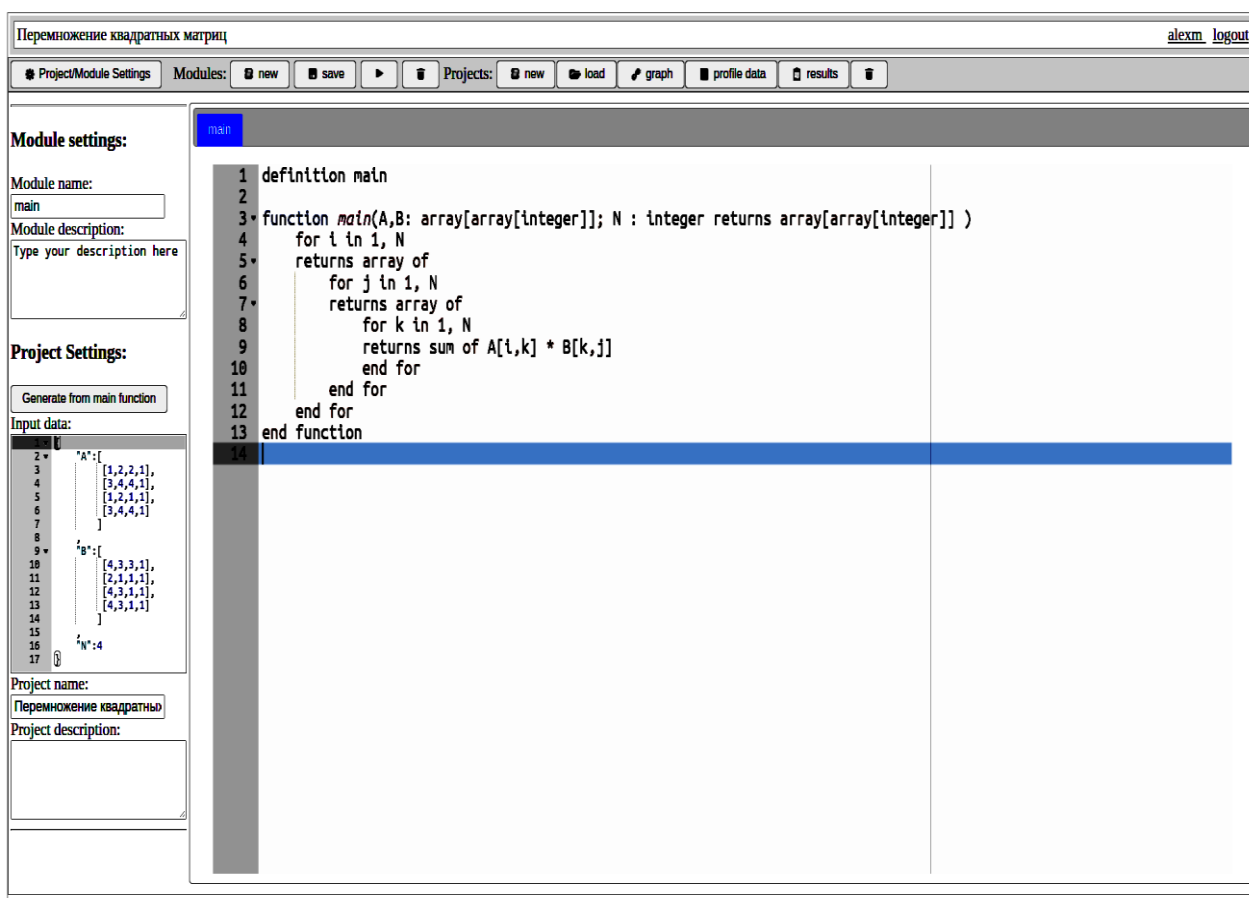


Рис. 1. Система CPPS

Проведено исследование задач визуализации графового внутреннего представления Cloud Sisal программ, а также визуализации процесса вычислений и отладки Cloud Sisal программ. Предложена модель визуализации графовой модели с портами и атрибутами с помощью статических изображений в формате векторной графики SVG. Описана модель отображения изменений графовой модели с портами и атрибутами с помощью анимаций, поддерживаемых форматом векторной графики SVG. Соединение графических анимаций,

отображающих изменения в визуальных стилях и изменений в атрибутах графовой модели с портами, реализовано с помощью безопасных сетей Петри. Описано моделирование вычислений, соответствующих функциям заданной Cloud Sisal программы с помощью иерархических сетей Петри, где переходы соответствуют функциям, а места аргументам и параметрам соответствующих функций. Также описаны модификации иерархических сетей Петри, обеспечивающие реализацию функциональности точек останова и редактирования аргументов или результатов функций при активированных точках останова в целях отладки с помощью добавления дополнительных мест и переходов.

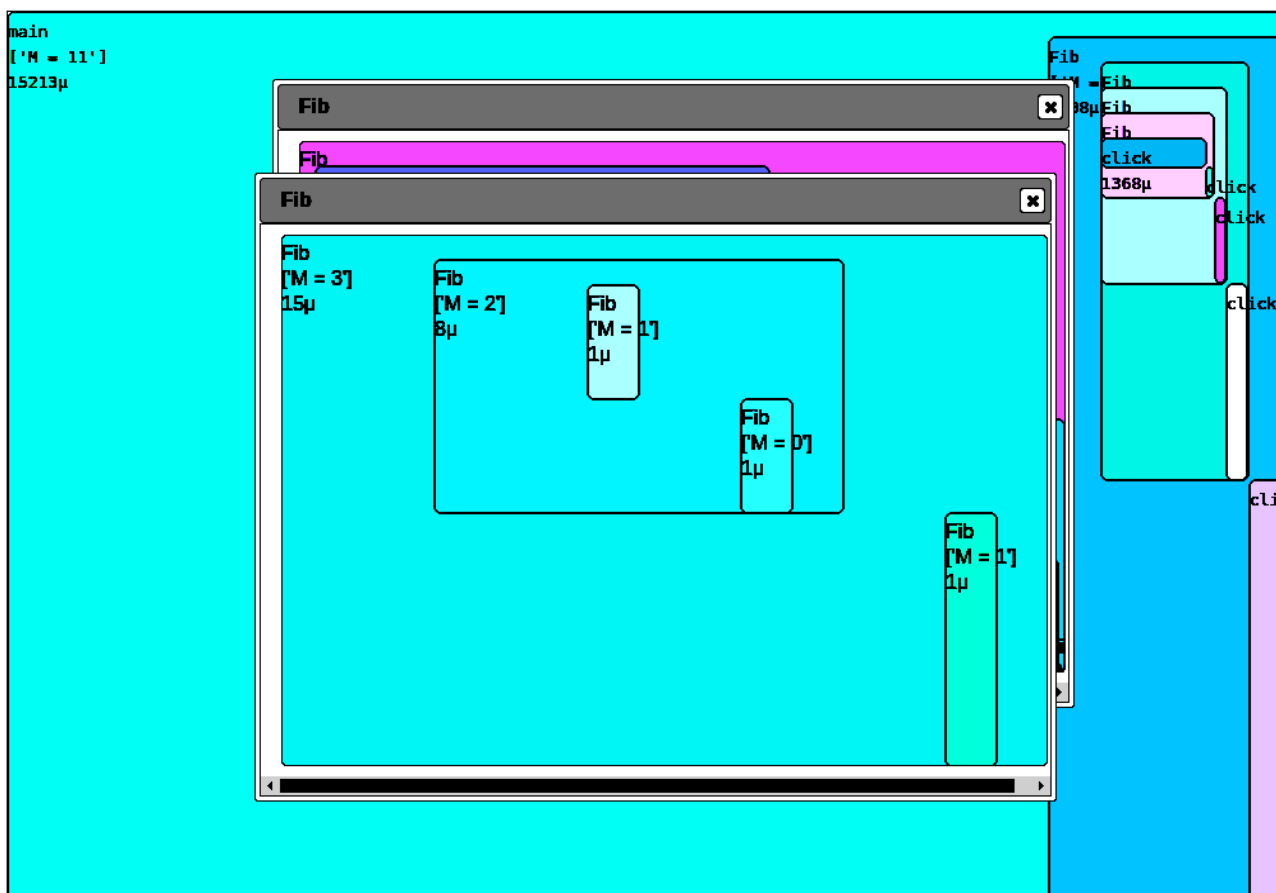


Рис. 2. Интерактивный просмотр результата работы профилировщика

На основе предложенных методов и модели разработана программа CSIRI, поддерживающая визуальную отладку Cloud Sisal программ, представленных в виде графового внутреннего представления на языке GraphML. Областью применения программы CSIRI является разработка Cloud Sisal программ, предназначенных для решения вычислительно-ёмких задач с помощью облачных вычислителей. Функциями программы CSIRI являются: интерпретация Cloud Sisal программы на данных малой размерности,

эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований отладка с помощью механизма точек останова, позволяющего просматривать и изменять промежуточные значения в ходе вычислений, генерация трассировочных данных процесса вычислений.

Проведено исследование существующих методов отладки функциональных программ на языках Haskell, F# и Common Lisp. На их основе разработаны методы отладки Cloud Sisal программ и выполнена их экспериментальная реализация для некоторого представительного подмножества языка Cloud Sisal виде отдельного компонента системы CPPS. Успешная практика применения подобных методов для других функциональных языков и успешные проведенные эксперименты показывают, что предложенные методы представляют интерес для их применения в отладчике системы CPPS. При их встраивании в отладчик они могут стать важным дополнением к используемым в отладчике методам визуальной отладки Cloud Sisal программ на основе их графового представления, поддерживаемым программой CSIRI.

Начата работа по государственной регистрации программ CPPS и CSIRI.

3. Развитие теоретико-графовых методов и инструментов для поддержки конструирования эффективных и надежных программ

Проведено исследование в области онтологии применения теоретико-графовых методов в информатике и программировании. Продолжались работы по пополнению электронного толкового словаря по графам в информатике WikiGRAPP новыми базовыми терминами и по его развитию путем улучшения описаний терминов и представления отношений между ними. Создана начальная версия электронного толкового словаря WikiGRAPP по теории графов и ее применениям в информатике и программировании, пригодная для научного и учебного применения (см. Рис. 3).

Проведено изучение с целью систематизации алгоритмов обработки, визуализации и применения теоретико-графовых методов в информатике и программировании. Продолжались работы по пополнению электронной энциклопедии WEGA алгоритмов решения задач информатики и программирования новыми статьями и по ее развитию путем улучшения статей и структуры энциклопедии. Среди новых аналитических статей, расширивших энциклопедию, выделим следующие: «Сравнение с шаблоном для сжатого текста», «Отказоустойчивые квантовые вычисления», «Сложность биматричного равновесия Нэша», «Сложность ядра», «Локальные аппроксимации задач об упаковке и покрытии», «Балансировка нагрузки», «Списочное планирование», «Локальные вычисления в

неструктурированных радиосетях», «Локальные аппроксимации задач об упаковке и покрытии», «Локальное выравнивание (с вогнутыми штрафами за открытие гэта)», «Разработка алгоритмов для вычислительной биологии», «Точные алгоритмы решения задачи о выполнимости формулы в КНФ общего вида», «Индексирование сжатого текста», «Обмен пакетами при переключении между несколькими очередями», «Маршрутизация», «Разработка высокоэффективных алгоритмов для крупномасштабных задач», «Покрытие множества почти последовательными подмножествами», «Приближенное сравнение регулярных выражений».

Т-Нумерация

T-Нумерация (*T-Nummering*) — такая нумерация вершин графа, что для некоторой фиксированной его обратной нумерации N справедливы следующие свойства:

- (1) для любых бивершин p и q : $T(p) < T(q)$ тогда и только тогда, когда $N(p) < N(q)$;
- (2) T -номера вершин N -области $N[p]$ образуют отрезок $[T(p), T(p) + |N[p]| - 1]$.

Литература

- Касьянов В. Н., Евстигнеев В. А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
- Касьянов В. Н. Оптимизирующие преобразования программ. — М.: Наука, 1988.

Рис. 3. Словарь WikiGRAPP

Подготовлена начальная версия электронной энциклопедии теоретико-графовых алгоритмов решения задач информатики и программирования WEGA, пригодная для учебных и научных применений (см. Рис. 4).

Разработан проект по развитию словаря WikiGRAPP и энциклопедии WEGA как систем для поддержки накопления и широкого использования знаний по теоретико-графовым моделям и методам решения задач информатики и программирования. В нем помимо

эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований дальнейшего развития словаря WikiGRAPP и энциклопедии WEGA, обусловленного постоянным развитием теоретико-графовых алгоритмов и моделей решения задач программирования, а также расширением их применения на новые предметные области, также предполагается разработка методов и средства визуализации систем и процессов на основе иерархических графовых моделей и высокоуровневых описаний алгоритмов.

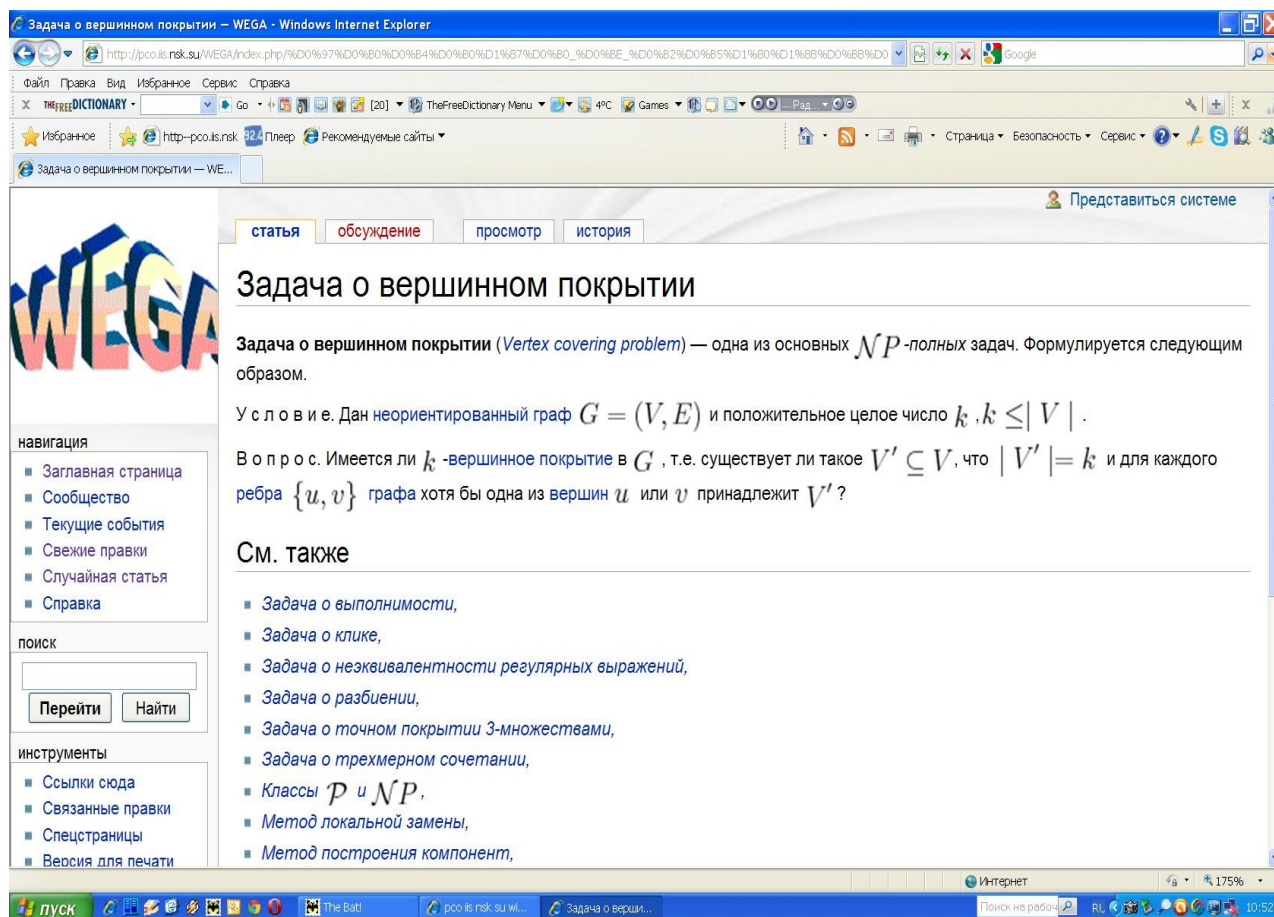


Рис. 4. Энциклопедия WEGA

Проект предполагает исследование задач построения, просмотра и анализа визуальных представлений структурированных данных большого размера на основе иерархических графовых моделей, а также задач построения на основе высокоуровневых описаний графовых алгоритмов, просмотра и анализа таких интерактивных визуализаций исполнений графовых алгоритмов, которые просты для восприятия и управления и наглядно демонстрируют их основные свойства. Цель исследований — построение расширяемой веб-системы для поддержки визуализации структурированной информации о системах и процессах на основе иерархических графовых моделей и высокоуровневых описаний графовых алгоритмов, которая будет интегрирована со словарем WikiGRAPP и

энциклопедией WEGA и могла бы быть использована для создания статических, динамических и интерактивных иллюстраций для вики-словаря WikiGRAPP и вики-энциклопедии WEGA.

Создаваемая веб-система, вики-словарь WikiGRAPP и вики-энциклопедия WEGA будут открыты для общего использования и позволят вовлечь в использование и накопление знаний по теоретико-графовым моделям и методам широкие массы программистской общественности. Свободное использование созданными инструментами всем программистским сообществом приведет к повышению эффективности и надежности компьютерного решения широкого класса прикладных задач, использующих теоретико-графовые модели и методы.

4. Разработка методов, алгоритмов и систем для исследования сложных больших данных, систем и процессов через их визуальные представления с использованием атрибутированных иерархических графовых моделей

Проведены исследования методов и средств визуального представления структурной информации с использованием графовых моделей. Разработаны новые методы и эффективные алгоритмы анализа и визуализации сложно организованной информации большого объема на основе атрибутированной иерархической графовой модели с портами.

Во многих приложениях объекты, моделируемые вершинами графа, содержат непересекающиеся логические местоположения (так называемые порты), через которые они (объекты) находятся во взаимосвязи, моделируемой дугами. Например, в графе программы, моделирующем поток данных в программе, операторы программы представляются вершинами графа, операнды операторов (их аргументы и результаты) моделируются портами вершин, а поток данных между результатами и аргументами операторов представлен дугами, соединяющим соответствующие порты.

Наглядность полученного изображения графа сильно зависит от того, как его элементы (вершины и дуги) расположены на плоскости. Циркулярное изображение графа — это такая укладка графа на плоскости, при которой все вершины графа помещаются на окружность некоторого круга, а каждая дуга рисуется внутри этого круга обычно в виде прямой линии. Однако проблема построения циркулярного изображения с минимальным количеством пересечений дуг является NP-полной. Циркулярная укладка находит свое применение в тех приложениях, где объекты, моделируемые вершинами графа, имеют равный приоритет, и ни

эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований один из них не занимает привилегированное положение. Циркулярные изображения графов используются для визуализации топологий кольцевых и звездных сетей, биологических и социальных сетей, а также небольших кластеров в больших графах. Поскольку эти приложения работают с большими данными, проблема разработки алгоритма циркулярной укладки для общих иерархических графов очень актуальна, но в настоящее время только для кластерных графов, представляющих собой простые иерархические графы без портов, был разработан алгоритм циркулярной укладки.

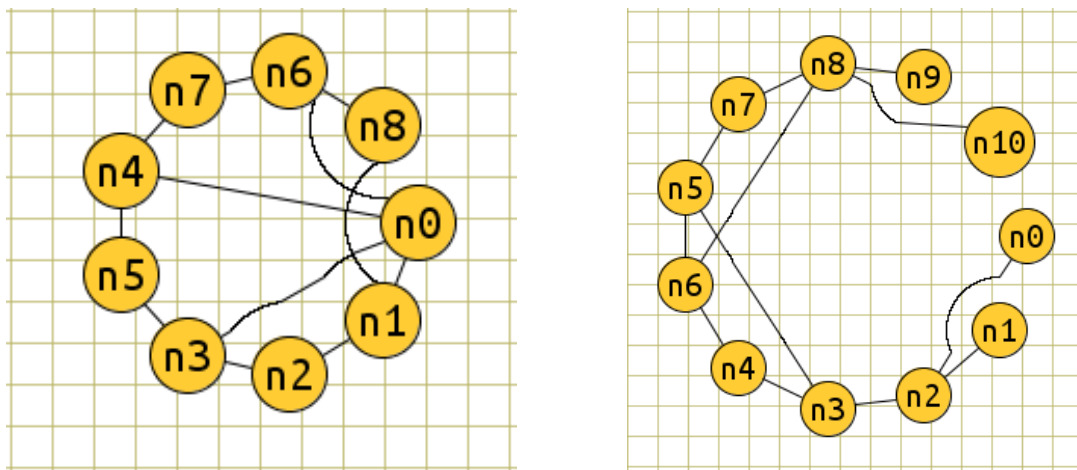


Рис. 5. Циркулярная укладка простых графов

На базе введенного понятия структурного расширения атрибутированного иерархического графа с портами разработан эффективный алгоритм циркулярной укладки иерархического графа с портами на плоскости и выполнена его реализация в рамках системы визуализации Visual Graph. Алгоритм использует специальную эвристику для минимизации пересечений «дуга-дуга», а также округлые вставки в дуги для решения проблемы пересечений «дуга-вершина» (см. Рис. 5).

Создана начальная версия системы визуализации Visual Graph, пригодная для научного и учебного применения (см. Рис. 6). Помимо существенного развития реализованных в системе методов и алгоритмов визуализации информации на основе графовых моделей и анализа ее структурных свойств, было произведено целый ряд изменений, основными из которых являются следующие.

Изменился пользовательский интерфейс системы. Панель с атрибутами была перенесена из нижней секции пользовательского интерфейса в секцию слева, что позволило увеличить просматриваемую область графического изображения.

Значения атрибутов были убраны с панели атрибутов и перенесены в область графового изображения, и теперь, когда пользователь выделяет элементы графового изображения, автоматически появляется информация о выбранных элементах. Данная информация представлена в виде сплошного текста, в котором можно осуществлять поиск, а так же копировать и переносить в другие сторонние утилиты. При желании можно скрыть данное меню. Миникарта переехала из отдельной секции пользовательского интерфейса и разместилась на графовом изображении, сверху справа. При желании теперь можно ее отключить.

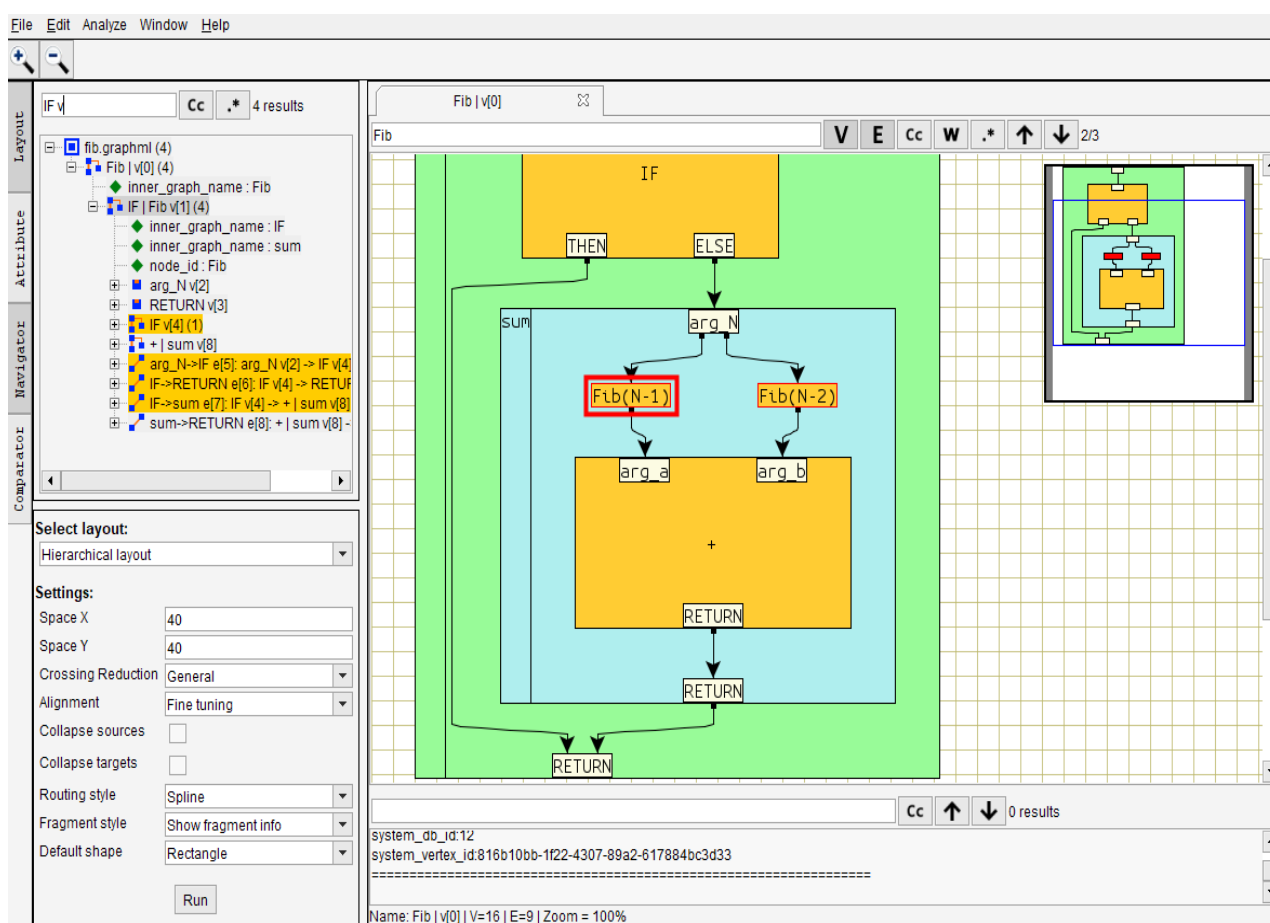


Рис. 6. Система Visual Graph

Изменилась работа с графовыми изображениями. В первоначальной версии системы Visual Graph, для отображения графов использовалась библиотека JGraph. Данная библиотека помимо отображения графов умела укладывать граф на плоскости, используя различные алгоритмы. Но эта библиотека обладала и рядом ограничений, которые не позволяли в полном объеме реализовать работу с иерархическими атрибутивными графами с портами. Основными из этих ограничений являлись проблемы при отображении

эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований графов с большим количеством элементов, а также отсутствие возможностей изменения способов отображения портов и фрагментов. Поэтому в новой версии было принято отказаться от данной библиотеки и реализовать собственный модуль для отображения графов, который бы удовлетворял всем необходимым требованиям.

Расширены возможности импорта и экспорта графов. Полностью реализован импорт графов по их представлениям в форматах Gml, Dot и GraphML. Завершается работа над инструментом по экспорту графов и/или выбранных их частей в файлы указанных форматов. Сейчас ведется активная доработка данного инструмента и его тестирование.

5. Заключение

На первом этапе выполнения проекта все поставленные задачи были достигнуты и получены следующие основные результаты. Разработаны новые методы и эффективные алгоритмы анализа и визуализации сложно организованной информации большого объема на основе атрибутированной иерархической графовой модели с портами. Создана начальная версия системы визуализации Visual Graph, пригодная для научного и учебного применения. Помимо существенного развития реализованных в системе методов и алгоритмов визуализации информации на основе графовых моделей и анализа ее структурных свойств, новая версия системы поддерживает улучшенные возможности по работе с графовыми изображениями, более удобный пользовательский интерфейс и расширенные возможности импорта и экспорта графов. Разработаны методы и программные средства, поддерживающие конструирование и визуальную отладку Cloud Sisal программ, представленных в виде их графового внутреннего представления на языке GraphML.

Список литературы

1. Images of Programming: Dedicated to the Memory of A. P. Ershov / Eds. D. Bjorner and V. Kotov. Amsterdam: North-Holland, 1991. 190 p.
2. Kasyanov V. N. A support tool for annotated program manipulation // Proc. of Fifth European Conf. on Software Maintenance and Reengineering. IEEE Computer Society Press, 2001.P. 85–94.
3. Kasyanov V. N. Transformational approach to program concretization // Theoretical Computer Science. 1991. Vol. 90, № 1. P.37–46.
4. Kasyanov V. N., Kasyanova E. V., Malishev A. A. Support tools for functional programming distance learning and teaching // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol.2099, 012052.
5. Kasyanov V. N., Kasyanova E. V., Malishev A. A. Support tools for functional programming distance learning and teaching // Marchuk Scientific Readings-2021: Abstracts of the Intern. conf., October 4–

- 8, 2021. Novosibirsk: Institute of comput. mathematics and mat. geophysics SB RAS, 2021. P.154–155.
6. Kasyanov V. N., Merculov A. M., Zolotuhin T. A. A circular layout algorithm for attributed hierarchical graphs with ports // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol.2099, 012051.
 7. Kasyanov V. N., Merculov A. M., Zolotuhin T. A. A circular layout algorithm for attributed hierarchical graphs with ports // Marchuk Scientific Readings-2021: Abstracts of the Intern. conf., October 4–8, 2021. Novosibirsk: Institute of comput. mathematics and mat. geophysics SB RAS, 2021. P.155.
 8. Андрей Петрович Ершов: ученый и человек / Отв. ред. А. Г. Марчук. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2001. 504 с.
 9. Гордеев Д. А. Модель визуализации и отладки на графовом представлении Cloud-Sisal программ // GraphiCon 2021: труды 31-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Нижний Новгород, 27–30 сент., 2021 г.), Нижний Новгород: Нижегород. гос. тех. ун-т, 2021. С.54–62.
 10. Ершов А. П. Избранные труды / Отв. ред. И. В. Поттосин. Новосибирск: Наука, 1994. 413 с.
 11. Касьянов В. Н. Оптимизирующие преобразования программ. М.: Наука, 1988, 335 с.
 12. Касьянов В. Н., Гордеев Т. А., Золотухин Т. А. и др. Система облачного параллельного программирования CPPS: визуализация и верификация Cloud Sisal программ / Отв. ред. В. Н. Касьянов. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. 256 с.
 13. Касьянов В. Н., Золотухин Т. А. Visual Graph — система для визуализации сложно структурированной информации большого объема на основе графовых моделей // Научная визуализация. 2015. Т. 7, № 4. С. 44–59.
 14. Касьянов В. Н., Евстигнеев В. А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 1104 с.
 15. Касьянов В. Н., Касьянова Е. В. Опыт преподавания программирования в пандемию // Информатика: проблемы, методы, технологии. Материалы XXI Международной научно-методической конференции. Воронеж: ООО «Вэлборн», 2021. С.1689–1698.
 16. Касьянов В.Н., Касьянова Е.В. Особенности преподавания программирования в пандемию // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации: Материалы Девятнадцатой открытой Всероссийской конференции. М.: ООО «1С-Публишинг», 2021. С.229–231.
 17. Касьянов В.Н., Малышев А.А. Программные средства поддержки дистанционного обучения функциональному программированию // Информатика: проблемы, методы, технологии. Материалы XXI Международной научно-методической конференции. Воронеж: ООО «Вэлборн», 2021. С.1834–1842.
 18. Касьянов В.Н., Малышев А.А. Программные средства поддержки дистанционного обучения функциональному программированию // Преподавание информационных технологий в

эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований

Российской Федерации: Материалы Девятнадцатой открытой Всероссийской конференции. М.: ООО «1С-Паблишинг», 2021. С.129–131.

19. Кламбоцкий К. А. Методы и средства отладки Cloud Sisal программ // Математика: Материалы 59-й Междунар. науч. студ. конф. 12–23 апреля 2021 г. / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2021. С.143.
20. Меркулов А. М. Циркулярная укладка атрибутированного иерархического графа с портами // Информационные технологии: Материалы 59-й Междунар. науч. студ. конф. 12–23 апреля 2021 г. / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2021. С. 26.
21. Электронная энциклопедия WEGA [Электронный ресурс] URL: <http://pco.iis.nsk.su/wega> (дата обращения: 11.04.2022)
22. Электронный словарь WikiGRAPP [Электронный ресурс] URL: <http://pco.iis.nsk.su/grapp> (дата обращения: 11.04.2022)