

Моя работа посвящена построению, анализу и оптимизации динамического потока данных в однородной распределенной среде. В этой работе были поставлены следующие цели:

- создание формальной модели потоков данных,
- анализ неопределенностей в схемах потоков данных,
- оценка ресурсов необходимых для запуска потока данных в распределенных средах.

Вначале рассмотрим понятия потоков данных. Поток данных является концепцией представления вычислительных процессов. Среди характерных особенностей потоков данных можно выделить представление в виде наборов независимых вычислителей (актеров, блоков) несущих определенный алгоритм обработки и связей между ними. Связи представляют из себя каналы передачи данных. Также обычно модели потоков данных допускают вложенные подпотоки и содержат некие стратегии запуска. Сама концепция потоков данных популярна в научных кругах и часто используется для задач с большими объемами данных и сложными распределенными системами благодаря понятности и простоте создания алгоритмов и изоляции от технических деталей распределенной системы и особенностей вычислений в ней. Рассмотрим способы представления потоков данных. Среди часто используемых можно выделить такие как:

- декларативные языки программирования (концепция которых очень близка к концепции потоков данных),
- графы (самый популярный способ представления из-за наглядной графической нотации),
- сети Петри (которые являются подклассом графов, особенно распространены для представления родственной концепции потоков работ),
- сети процессов Кана (используются для описания алгоритмов потоковой обработки).

В нашей модели используется представление в виде графа. Весь поток данных представляется в виде четверки:

- $B$  — множество блоков,
- множество  $E$  задает связи или каналы передачи данных,
- множества  $I$  и  $O$  описывают собственные входные и выходные порты потока данных подобно блоку.

Блок в нашей модели также представляется в виде кортежа:

- наборы  $I$  и  $O$  входных и выходных портов блока,
- $FA$  — конечный автомат Мили.

В реальных системах построения и запуска потоков данных каждый блок несет детерминированный алгоритм обработки данных, однако во время статического анализа данные недоступны, поэтому алгоритм блока в нашей модели описывается автоматом Мили, который показывает лишь качественное поведение блока — он содержит набор характерных состояний, ребра автомата показывают по какому набору портов блоку требуются данные и что блок выдаст в результате работы. Опять же из-за недоступности конкретных данных, автомат Мили несколько отличается от классического определения, в частности он может быть недетерминированным и часто не полным. Входной и выходной алфавиты соответственно множество подмножеств входных и выходных портов.

На слайде Вы можете видеть графическую нотацию блоков автомата Мили и всего потока данных. На первом слайде нарисован блок отвечающего за цикл и его автомат Мили. Поясним принцип автомата Мили этого блока. Состояние `initial` соответствует отсутствию внутреннего состояния алгоритма блока. Состояние `non_trivial` соответствует промежуточному состоянию — блок находится в процессе итерации. Переход из `initial` в `initial` отвечает за пустой список для преобразования. Переход из начального состояния в состояние итерации соответствует началу работы, то есть первой итерации. При этом блок поглащает сам список и выдает его первый элемент. Далее в состоянии итерации блок ожидает преобразованное значение и соответственно может выйти из цикла, излучив результат, либо продолжить итерацию в зависимости от длины остаточного списка.

На следующем слайде показан иерархический поток данных. Для удобства введены два фиктивных блока — `source` и `stock`, которые соответствуют входным и выходным портам потока данных. Внутри рамочки выделен подпоток данных.

Теперь о работе самого потока данных. В процессе работы потока данных, любой блок может находиться в одном из трех состояний:

- свободен — означает, что блоку не хватает данных для начала работы;
- работает,
- заблокирован.

В нашей модели для простоты все связи могут хранить не более одного набора данных, поэтому завершивший свою работу блок переходит в состояние заблокирован, если он не может излучить результат своей работы. Он продолжает находиться в этом состоянии ровно до тех пор, пока не может полностью излучить данные. На слайде можно видеть схему работы каждого блока. Ребра соответствуют соответствующим условиям переходов.

Алгоритм работы всего потока данных можно видеть на слайде. В начале работы система управления опрашивает каждый блок, чтобы узнать необходимые наборы данных для запуска. Далее данные передаются необходимым блокам и осуществляется проверка на возможность перевода блока из состояния заблокирован. Так система управления разрешает состояния блокировки, далее ожидает окончания работы какого-либо блока, затем процедура повторяется. Поток данных завершается, если все блоки свободны и данные остались только на выходных портах потока данных.

Такая модель потоков данных является довольно гибкой и удобной для описания вычислений, однако она допускает неопределенности в своей работе. Некоторые неопределенности связаны с заменой алгоритмов блоков на автоматы Мили. Так в реальных запусках такие неопределенности отсутствуют, так как данные однозначно определяют поведение потока в этом случае. Такие неопределенности будем называть неопределенности первого рода.

Однако сама схема может так же допускать неопределенности, такие как несколько способов поглощения одного и того же набора данных, состояния гонок, также к неопределенностям отнесем возможность некорректного завершения потока данных. Такие неопределенности будем называть неопределенностями второго рода и будем считать их наличие ошибкой построения схемы, так как при их наличии в зависимости от обстоятельств запуск поведение и соответственно результат всего потока может различаться от запуска к запуску. Поэтому поток данных содержащий такие ошибки нуждается в исправлении, а его анализ лишен смысла.

Корректным потоком данных будем называть поток, схема которого не допускает неопределенностей второго рода.

Для начала введем понятие траектории запуска потока данных. В зависимости от времен затраченных блоками для работы и вариантов разрешения неопределенностей первого рода, поток данных будет вести себя различным образом. Траектория — последовательность состояний потока данных во все моменты модельного времени при определенных временах работы блоков и способе разрешения неопределенностей. Каждая траектория порождает так называемый граф причинности или граф задач. Таким образом все возможные траектории разбиваются на классы эквивалентности. При корректном потоке данных, каждый класс определяется лишь способом разрешения неопределенностей и содержит траектории со всевозможными наборами времен работы блоков.

На этом факте основан предлагаемый волновой алгоритм. В работе представлены два варианта этого алгоритма: простой для случая корректных ациклических потоков данных и алгоритм для общего случая корректных потоков данных. На первом слайде приведена словестная формулировка простого алгоритма. Сам алгоритм представляет из себя моделирование работы потока данных, учитывающий все неопределенности. Алгоритм представлен в виде рекурсивной функции, на вход которой подается в том числе и частичный граф причинности, который алгоритм достраивает в зависимости от варианта разрешения неопределенностей. В результате, начальный запуск функции вернет множество всех возможным графов причинности.

Волновой алгоритм для общего случая отличается способом разрешения циклов — для того строится внутренний автомат потока данных. Алгоритм также представляется в виде рекурсивной функции, которая проверяет, наличие в промежуточном внутреннем автомате вершины соответствующей обрабатываемому состоянию потока данных.

Изначально рассматривалась возможность введения в автомате Мили распределений вероятностей переходов и времен их работы. Однако пример, часто использующийся на практике, изображенный на слайде показывает, что данный подход приводит к плохим результатам. Для этого достаточно рассмотреть произвольное распределение на переходах автомата Мили блока цикла. Формула для мат. ожидания длины цикла, которое определяет

время работы всего потока данных, приведена на слайде. Однако на практике типичный диапазон длин может охватывать несколько порядков, что говорит о бессмысленности рассмотрения подобных оценок.

Поэтому было принято решение отказаться от введения распределений вероятностей и следовать подходу, напоминающему минимаксный метод оценивания. Для анализа ресурсов требуемых потоком данных, требуется рассмотрение всех графов причинности, которые и описывают вариант поведения потока данных. Для простоты будем считать, что поток данных выполняется в гомогенной распределенной среде, а один блок для работы требует один вычислитель. Заметим, что алгоритм использующийся для анализа позволяет отказаться от этих предположений. Для оценки ресурсов будем рассматривать так называемые срезы графа причинности и эволюции графа причинности — множество независимых задач и их последовательные связанные цепочки. Каждой возможной эволюции графа причинности поставим в соответствие максимальную мощность среза. Эта величина будет определять максимальную загруженность. Соответственно для графа причинности можно получить минимум и максимум этих оценок.

Данные оценки можно получить с помощью алгоритма HEFT.

В большинстве прикладных потоков данных оценки дают малый разброс, однако в ряде специальных случаев дают разброс может быть существенным. Для решения этой проблемы предлагается метод динамического уточнения оценок. Не трудно заметить, особенно из волнового алгоритма, что многие графы причинности имеют общий подграф, соответствующий началу работы. Фактически волновой алгоритм строит префиксное дерево графов причинности, так как каждый рекурсивный вызов функции волнового алгоритма дорабатывает граф в зависимости от варианта разрешения неопределенностей. Метод динамического уточнения основывается на вычислении упомянутых оценок в вершинах этого дерева для остаточных графов. Для примера рассмотрим поток данных изображенный на рисунке. Для этого потока возможны три графа причинности, которые соответствуют ветвям условных переходов. На графике видны изменения все четырех оценок ресурсов в зависимости от модельного шага, в случае если реализовывается второй граф причинности.

Все рассмотренные алгоритмы и соответственно оценки верны только для корректных потоков данных. Они допускают расширение на случай некорректных потоков данных, однако, как уже было сказано, такие потоки нуждаются скорее в исправлении, нежели анализе. Рассмотрим теперь задачу проверки потока данных на корректность. В волновых алгоритмах уже были неявно рассмотрены случаи некорректного завершения и вариантов поглощения данных, поэтому нас будет интересовать задача обнаружения состояний гонок. Существует два типа состояний гонок: изменение набора входных портов при поглощении и наличие вариантов поглощения из одного порта. Для обнаружения этих типов состояний гонок была рассмотрена модификация волнового алгоритма, заключающаяся в процедуре проверки при каждом поглощении данных. Эта процедура осуществляет проверку на наличие неопределенностей по истории поглощений из портов блока. Также вводится история волны, которая реализует проверку на корреляцию волн — волны считаются коррелирующими, если одна является потомком другой. Некоррелирующие волны считаются конкурирующими и именно они могут изменять порядок поглощения при изменении времен работы блоков.

Отдельно стоит рассмотреть класс блоков, автоматы Мили которых являются детерминированными по входу, или, другими словами, для которых в каждом состоянии существуют переходы только по одному набору входных портов. Так этот класс автоматов Мили автоматически исключает состояние гонки, связанное с различными вариантами поглощения. Любой алгоритм блока можно модифицировать таким образом, что его автомат Мили станет детерминированным по входу. Однако часто это порождает неудобства при построении потока данных. Для примера можно рассмотреть модификацию блока аппроксиматора. Обычно процесс аппроксимации представляется двумя блоками: один строит модель, второй получает на вход модель и вычисляет аппроксимированные значения в подаваемых точках. На слайде изображено два варианта автоматов блока. Недетерминированный вариант алгоритма в состоянии `with_model` мог принимать как новую точку, так и новую модель. Для превращения к детерминированному виду потребовалось ввести дополнительный порт `action`, который определяет следующее действие: ожидание новой точки, либо новой модели. Из рисунка видно, что автомат заметно усложнился, а новый принцип его работы вносит дополнительные трудности в построении потока данных. Заметим, что подобным образом можно преобразовать любой алгоритм блока к детерминированному виду.

На этом моя дипломная работа завершается. В результате проделанной работы была построена модель потоков данных, основной особенностью которой была замена алгоритма блока на автомат Мили, качественно описывающий поведение блока. Далее модель была исследована, были выявлены все случаи неопределенностей — одни являются следствием упрощения описания блока, другие возникают из-за ошибок построения схемы потока данных. Далее были предложены алгоритмы нахождения графов причинности, каждый из которых полностью описывает поведение потока в одном случае. По этим графам были найдены оценки для необходимого количества вычислителей для наилучшего запуска потока данных в распределенной среде. Также был предложен метод динамической корректировки этих оценок в процессе работы потока данных. Также была рассмотрена задача проверки потока данных на корректность.

В процессе работы были выявлены следующие возможные дальнейшие исследования:

- Введение более сложной системы оценки времен работы и вероятностей переходов блоков, которая возможно даст положительные результаты. Одним из возможных вариантов — введение характеристических чисел для данных и правила их преобразования блоками.
- В процессе работы рассматривалась идея оценки наилучших параметров запуска путем автоматической кластеризации блоков для создания многоуровневой иерархии. Один из возможных вариантов — создание шаблонов составных блоков и поиск по ним.
- Также возможны модификации самой модели потоков данных.
- Возможно расширение алгоритмов для анализа поведения потоков данных в гетерогенных средах.

- В этой работе частично рассматривалась идея ограничения классов автоматов для конкретного класса. Также возможно ограничение на наборы используемых атомарных блоков, с целью получения потоков, с определенными свойствами.

The End.